

**UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI
TEHNOLOGIE POLITEHNICA BUCUREȘTI**

ȘCOALA DOCTORALĂ TRANSPORTURI

**Soluții pentru monitorizarea și diagnoza de la
distanță a instalațiilor de centralizare
electrodinamică**

Teză de doctorat

Rezumat extins

Autor: As. drd. ing. Florin BĂDĂU

Conducător științific: Prof.em.dr.ing. Corneliu Mihail ALEXANDRESCU

**București
2024**

Prefață

Nu ar fi o greșeală să punem semnul egal între calea ferată și modernitate. Această invenție apărută în mijlocul revoluției industriale a fost fundamentală în dezvoltarea economică și socială la nivel mondial. Privind domeniul transporturilor la nivel general, domeniul feroviar are o istorie de aproape două secole. Deschiderea primei linii de cale ferată între Liverpool și Manchester (1830) precedă cu peste jumătate de secol invenția primului autovehicul (1885) și cu șapte decenii pe cea a primului avion (1903).

Problema dirijării sigure a traficului feroviar a reprezentat o prioritate încă din deceniile timpurii ale domeniului. Soluțiile dezvoltate au evoluat împreună cu progresul tehnologic de la niște sisteme mecanice rudimentare, la sisteme electrice avansate și până la sistemele electronice de ultimă generație din prezent.

Siguranța circulației a fost și continuă să fie prioritatea absolută a domeniului feroviar. Prin oferirea unui nivel ridicat de importanță acestui aspect, domeniul feroviar este caracterizat printr-un conservatorism tehnic. Mai exact, ritmul de adoptare al noilor tehnologii este mult mai încet decât în cazul altor ramuri ale ingineriei. Acest pas redus este motivat de nevoia de a folosi tehnologii aflate la maturitate, ale căror slăbiciuni au putut fi detectate și remediate în timp.

În prezent la nivel european încă predomină ca procent instalațiile de centralizate din generațiile vechi. În cazul instalațiilor mecanice există numeroase exemple de sisteme care funcționează de peste un secol.

Este de așteptat ca instalațiile mecanice să fie înlocuite de sisteme electronice într-un orizont de timp de maxim 20 de ani, cu menținerea câtorva sisteme pentru conservare istorică. Înlocuirea instalațiilor cu relee este așteptată să nu decurgă atât de simplu, neputând fi estimat un orizont de timp pentru înlocuirea completă a acestora. Motivele pentru acest fapt sunt expuse pe larg în prezenta lucrare.

Un punct slab al vechilor tehnologii de centralizare este nevoia unui număr mai mare de personal pentru operarea și întreținerea instalațiilor și echipamentelor feroviare decât în cazul sistemelor electronice moderne. Acest fapt se traduce printr-un număr minim absolut de angajați care este necesar pentru menținerea în stare de funcționare a sistemului feroviar.

O problemă care nu este specifică doar domeniului feroviar, dar care are potențialul de a afecta siguranța circulației este necesarul de personal care nu mai poate fi acoperit. Un alt punct slab este lipsa tot mai acută a personalului calificat pentru instalațiile din generații anterioare.

Prezenta lucrare propune o soluție pentru a compensa deficitul de personal prin implementarea unui sistem suport pentru instalațiile de centralizare cu relee de tip CED. Soluția se dorește a ajuta la detectarea și remedierea mult mai rapidă a deranjamentelor din instalațiile de centralizare. Printre avantajele soluției propuse se numără costul redus de implementare, tehnica neinvazivă de interacțiune cu instalațiile existente, precum și posibilitatea de a putea fi

utilizată și de personalul care are o pregătire tehnică elementară despre funcționarea instalațiilor CED.

Totodată lucrarea propune o structură de virtualizare a logicii hardware a instalațiilor CED în logică software pentru sistemele de centralizare electronic prin utilizarea limbajului Ladder pentru PLC-uri. Prin traducerea directă a schemelor instalațiilor CED se poate reduce timpul de proiectare al noilor sisteme electronice, precum și costul de dezvoltare al acestora.

Prezenta lucrare este structurată pe cinci capitole rezumate mai jos.

Capitolul 1 cuprinde o prezentare a principalelor elemente și sisteme specifice sistemului feroviar. Sunt detaliate principiile de proiectare ale instalațiilor de centralizare, precum și particularitățile tehnice ale principalelor generații de instalații de centralizare (mecanice, rele și electronice). Capitolul conține și o analiză a situației actuale la nivel european în ceea ce privește distribuția tipurilor de sisteme de centralizare, precum și previziuni privind evoluția domeniului.

Capitolul 2 include o analiză a principalelor tehnologii de automatizare folosite în prezent, cu evidențierea aplicațiilor din domeniul feroviar. Sunt prezentate și analizate echipamentele de tip PLC, utilizate pe scară largă în domeniul industrial, precum și rețelele de senzori fără fir (WSN) care devin tot mai extinse în contextul dezvoltării aplicațiilor IoT.

Capitolul 3 conține descrierea soluției propuse. Sunt prezentate componentele fizice folosite pentru testarea conceptului, dar și platformele folosite pentru dezvoltarea componentelor software (Arduino IDE și Arduino PLC IDE). Partea centrală a acestui capitol este dedicată traducerii logicii hardware aferente stației de test în logică software de tip Ladder. Sunt detaliate principiile de proiectare software prin stabilirea unor reguli standard de dezvoltare a funcțiilor logice pornind de la schemele tradiționale cu rele.

Capitolul 4 este dedicat expunerii testelor efectuate pe parcursul dezvoltării soluției. Prima serie de teste au fost efectuate pentru stabilirea potențialului de utilizare al magnetometrelor pentru monitorizarea releelor feroviare. Este prezentat modelul teoretic dezvoltat pentru simularea comportamentului magnetic al releelor, precum și rezultatele măsurătorilor fizice în mai multe scenarii de funcționare.

Al doilea set de teste este dedicat evaluării acurateței rețelei WSN propuse pentru monitorizarea instalației CED. Testele verifică detectarea în timp real a stării releelor monitorizate, reproducerea logicii hardware prin intermediul software-ului încărcat pe PLC și compararea celor două surse distincte de date.

Capitolul 5 este dedicat prezentării concluziilor cercetării științifice, menționarea și evidențierea contribuțiilor proprii, precum și propunerea principalelor direcții de cercetare pentru viitor.

Cuprins

DICȚIONAR EXPLICATIV DE TERMENI ȘI ABREVIERI.....	4
LISTA FIGURILOR	6
LISTA TABELELOR	8
CAPITOLUL 1. CENTRALIZĂRI FERROVIARE – O INTRODUCERE.....	9
1.1 CONCEPTE FUNDAMENTALE.....	9
1.1.1 Elementele de bază ale căii ferate	9
1.1.2 Parcurhuri	9
1.1.3 Principii de proiectare ale instalațiilor de centralizare.....	10
1.2 CENTRALIZĂRI MECANICE	10
1.3 CENTRALIZĂRI CU RELEE	10
1.3.1 Tranziția mecanic-electric.....	10
1.3.2 Relee – noțiuni generale.....	10
1.3.3 Relee feroviare	11
1.3.4 Evoluția centralizărilor cu relee	11
1.3.5 Instalațiile CR-3	11
1.4 CENTRALIZĂRI ELECTRONICE	13
1.4.1 Considerente generale	13
1.4.2 Redundanța.....	13
1.4.3 Arhitectura centralizărilor electronice	13
1.5 STADIUL ACTUAL AL CENTRALIZĂRILOR	15
CAPITOLUL 2. TEHNOLOGII DE AUTOMATIZARE.....	16
2.1 REȚELE DE SENZORI FĂRĂ FIR	16
2.1.1 Descriere și aplicații generale	16
2.1.2 Topologii de rețele de senzori.....	17
2.1.3 Tehnologii de comunicații pentru rețele WSN	18
2.1.4 Aplicații în domeniul feroviar.....	18
2.2 CONTROLLERE LOGICE PROGRAMABILE (PLC).....	20
2.2.1 Prezentare generală	20
2.2.2 Programarea PLC-urilor.....	21
2.2.3 Limbajul Ladder.....	22

2.2.4	Tehnologii de comunicații pentru PLC-uri	23
2.2.5	Aplicații în domeniul feroviar.....	25
CAPITOLUL 3. CONTRIBUȚII PRIVIND MONITORIZAREA ȘI DIAGNOZA INSTALAȚIILOR CED		26
3.1	SCOPUL ȘI MOTIVAȚIA	26
3.2	SCHEMA BLOC A SISTEMULUI DE MONITORIZARE ȘI DIAGNOZĂ	27
3.3	RAMA DE RELEE ȘI PUPITRUL DE COMANDĂ.....	28
3.4	CONTROLER CENTRAL	30
3.4.1	Cerințe generale	30
3.4.2	Portenta Machine Control	31
3.5	NUCLEUL NODURILOR DE SENZORI	31
3.5.1	Cerințe generale	31
3.5.2	Placa de dezvoltare Sparkfun ESP8266 Thing Dev.....	32
3.6	MAGNETOMETRUL	32
3.6.1	Principii de funcționare	32
3.6.2	Echipamentul utilizat – MAG3110.....	33
3.7	PLATFORMA ARDUINO IDE.....	33
3.8	PLATFORMA ARDUINO PLC IDE.....	34
3.9	DEZVOLTAREA PROGRAMULUI DE CENTRALIZARE	36
3.9.1	Experiențe anterioare	36
3.9.2	Stabilirea principiilor de dezvoltare	36
3.9.3	Configurări de comunicații	48
CAPITOLUL 4. TESTAREA ȘI VALIDAREA DATELOR.....		49
4.1	MONITORIZAREA RELEELOR FERROVIARE PRIN MAGNETOMETRE	49
4.1.1	Considerente teoretice	49
4.1.2	Modelarea releelor feroviare	50
4.1.3	Efectuarea măsurătorilor	55
4.1.4	Prelucrarea și interpretarea datelor	56
4.2	IMPLEMENTAREA UNEI REȚELE WSN PENTRU INSTALAȚIILE CED.....	60
4.2.1	Considerente generale	60
4.2.2	Desfășurarea măsurătorilor	60

4.2.3	Prelucrarea și interpretarea datelor	62
CAPITOLUL 5. CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE		69
5.1	DIRECȚII DE CERCETARE.....	70
LUCRĂRI PUBLICATE DE AUTOR		72
BIBLIOGRAFIE		73

Dicționar explicativ de termeni și abrevieri

2002 – logică 2 din 2

2003 – logică 2 din 3

CE – Centralizare electronică

CED – Centralizare electrodinamică

CEL – Centralizare electronică de linie

CEM – Centralizare electromecanică

CF – Cod fișă

CFR – Căile Ferate Române

COTS – Commercial off-the-shelf

CR-2/3 – Centralizare cu releu

CRM – centralizare releu metrou

FBD – Function Block Diagram

HMI – Human Machine Interface

I2C – Inter-Integrated Circuit

ICB – Instalație cu chei și bloc

IDE – Integrated development environment

IDM – Impiecat de mișcare

IoT – Internet of Things

LD – Ladder Logic

LI – Instruction List

Linie curentă – segmentele de linie cuprinse între semnalele de intrare ale două stații adiacente

NAND – ȘI NEGAT

NF – Neutru fișă

NOR – SAU NEGAT

OSI – Opens Systems Interconnection

Parcurs – ruta cuprinsă între două semnale de-a lungul căreia se poate deplasa un tren

Parcursuri compatibile – parcursuri care pot fi executate simultan

Parcursuri incompatibile – parcursuri a căror execuție simultană nu este permisă

PLC – Programmable Logic Controller

PMC – Portenta Machine Control

RCC - Rail Communications and Control

SBW – Südbahnwerke

SCADA – Supervisory control and data acquisition

Schema DA – Schema releelor de dezăvorâre artificială

Schema EF – Schema releelor de excludere frontală

Schema IP – Schema releelor de începere a parcursurilor

Schema KS – Schema releelor de control ale secțiunilor

Schema P – Schema releelor de parcurs

Schema Z – Schema releelor zăvor

Semafor – echipament amplasat de-a lungul căii de rulare care oferă indicații sub formă de poziționare a unor brațe mecanice, completate de semnale luminoase către mecanicul de tren

Semnal – echipament amplasat de-a lungul căii de rulare care oferă indicații sub formă de semnale luminoase către mecanicul de tren

SFC – Sequential Function Charts

ST – Structured Text

TCP – Transmission Control Protocol

UDP - User Datagram Protocol

VES – Vereinigte-Eisenbahn Signalwerke

WABCO - Westinghouse Air Brake Company

WSN – Wireless Sensor Network

WSSB – Werk für Signal- und Sicherungstechnik Berlin

Lista figurilor

Figura 1.	Principalele elemente ale unei stații de cale ferată	9
Figura 2.	Dependențele schemelor CR-3 [23].....	12
Figura 3.	Structura unei instalații ESTW [10]	14
Figura 4.	Distribuția tipurilor de centralizări	15
Figura 5.	Topologii ale rețelelor WSN.....	17
Figura 6.	Arhitectura tipică a unui PLC [47]	20
Figura 7.	Exemplu de program Ladder	22
Figura 8.	Arhitectura tipică a unui sistem SCADA	24
Figura 9.	Arhitectura Eurolocking	25
Figura 10.	Schema bloc a sistemului.....	27
Figura 11.	Principalele fluxuri informaționale ale sistemului propus.....	27
Figura 12.	Planul stației A.....	28
Figura 13.	Rama de relee din dotarea departamentului TET	28
Figura 14.	Pupitru CR-2 vertical.....	29
Figura 15.	Controlerul Portenta Machine Control [57].....	31
Figura 16.	Placa de dezvoltare ESP8266 Thing Dev [61]	32
Figura 17.	Schema (a) și aspectul (b) modului MAG3110 [66][67].....	33
Figura 18.	Interfața Arduino PLC IDE	34
Figura 19.	Structura unei aplicații dezvoltate cu Arduino PLC IDE	35
Figura 20.	Y2 IP – schemă cu relee (a) și Ladder (b)	37
Figura 21.	2 EFX – schemă cu relee (a) și Ladder (b)	38
Figura 22.	1 Z și 1 DA – schemă cu relee.....	38
Figura 23.	1 Z și 1 DA – Ladder	39
Figura 24.	Schema grupului termic	39
Figura 25.	Implementarea grupul termic în Ladder	40
Figura 26.	Schema KS a stației A (capătul X)	41
Figura 27.	Introducerea variabilelor (releelor) totalizatoare pe ramură.....	42
Figura 28.	Schema KS în Ladder	44
Figura 29.	Amplasarea variabilelor totalizatoare în schema S.....	45
Figura 30.	Schema P a stației A (capătul X)	46
Figura 31.	Amplasarea variabilelor totalizatoare în schema P.....	46
Figura 32.	Structura generală a proiectului Ladder.....	47
Figura 33.	Dimensiunile bobinelor utilizate în releele NF cu două bobine [78].....	51
Figura 34.	Modelul 3D al bobinelor NF1-800	52
Figura 35.	Inducția magnetică simulată în planul xOz (NF1-800)	53
Figura 36.	Influența releelor adiacente în planul xOy.....	54
Figura 37.	Influența releelor adiacente în planul xOy pe carcasa releului.....	54

Figura 38. Grila de măsurători definită în jurul unui releu feroviar [78].....	55
Figura 39. Liniile de câmp pentru planul xOz – Releu nealimentat	57
Figura 40. Liniile de câmp pentru planul xOz – Releu alimentat complet	57
Figura 41. Liniile de câmp pentru planul xOz –L1-3 alimentat.....	58
Figura 42. Liniile de câmp pentru planul xOz –L2-4 alimentat.....	58
Figura 43. Câmpul magnetic pentru alimentare prin: L1-3 (a), L2-4 (b) și complet (c) [78].	59
Figura 44. Locul de legătură al intrărilor digitale PMC (schema KS).....	61
Figura 45. PMC montat în rama CED.....	61
Figura 46. Amplasarea nodului de senzor pe un releu NF.....	62
Figura 47. Ansamblul de testare.....	62
Figura 48. Secvența de funcționare a releelor pentru parcursul de ieșire de la Y2.....	63
Figura 49. Starea variabilelor Ladder la comandarea parcursului de ieșire Y2	64
Figura 50. Starea variabilelor Ladder la anularea parcursului de ieșire Y2.....	64
Figura 51. Stabilirea parcursului de ieșire de la Y2 – rețea WSN	65
Figura 52. Anularea parcursului de ieșire de la Y2 – rețea WSN	66
Figura 53. Stabilirea parcursului Ladder vs. WSN	67
Figura 54. Anularea parcursului Ladder vs. WSN	67
Figura 55. Compararea variabilelor Ladder cu cele din rețeaua WSN	68

Lista tabelelor

Tabelul 1.	Corespondența dintre stiva OSI și stiva WSN.....	18
Tabelul 2.	Inductanța măsurată în punctul de măsură 333 [78].....	59
Tabelul 3.	Diferența de timp dintre variabilele Ladder și cele din rețeaua WSN.....	66

Capitolul 1. Centralizări feroviare – o introducere

1.1 Concepte Fundamentale

Dezvoltarea sistemelor feroviare a avut un impact profund asupra dinamicii globale, permițând transportul rapid al mărfurilor și persoanelor. Acest subcapitol detaliază elementele de bază ale căii ferate și componentele esențiale pentru dirijarea traficului feroviar, inclusiv macazurile și semnalele.

1.1.1 Elementele de bază ale căii ferate

O linie de cale ferată este formată din două șine metalice montate perpendicular pe traverse de lemn, metal sau beton armat. Segmentul de linie cuprins între două stații se numește linie curentă. Liniile din stații pot fi directe sau în abateri, în funcție de cum se ramifică din linia curentă. Dirijarea trenurilor este imposibilă fără macazuri, care permit deplasarea trenurilor de pe o linie pe alta, și semnale, care oferă indicații mecanicilor de tren [1] [2].

Semnalul feroviar este un echipament montat în dreptul liniei de cale ferată, utilizat pentru a emite și recepționa comenzi și indicații către mecanicii de tren [2]. Primele semnale au apărut ca o necesitate odată cu extinderea rețelilor feroviare și creșterea traficului. La început, informațiile erau transmise mecanicilor prin intermediul steagurilor pe timp de zi și al felinarelor pe timp de noapte [3]. Acestea au evoluat în semnale de tip paletă, a căror stare putea fi modificată printr-un sistem de tije, pârghii și mânere. În prezent, termenul "semnal" se referă în general la semnalele electrice, în timp ce pentru cele mecanice se utilizează termenul semafor. Semnalele sunt clasificate conform funcțiilor pe care le deservește [4] [5][6].

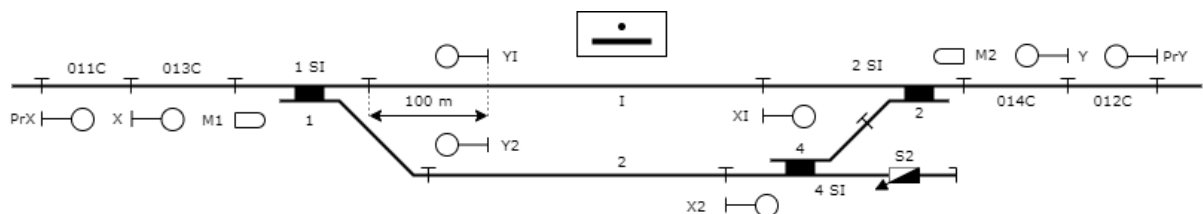


Figura 1. Principalele elemente ale unei stații de cale ferată

1.1.2 Parcurhuri

Un parcurs este o rută delimitată de două semnale succesive pe care se poate deplasa un tren în interiorul unei stații. Parcursurile sunt clasificate în parcurhuri de circulație și de manevră, diferențiate prin viteza de desfășurare și zona de operare [1][5]. Parcursurile pot fi compatibile (executabile simultan) sau incompatibile (grad 0, I sau II) [7]. Incompatibilitățile sunt gestionate prin drumuri de alunecare și linii de evitare prevăzute cu saboți de deraiere [8].

Ciclu de viață al unui parcurs implică comanda, verificarea și înzăvorârea parțială sau totală a elementelor implicate [6].

1.1.3 Principii de proiectare ale instalațiilor de centralizare

Centralizarea feroviară implică controlul obiectelor unei stații (macazuri, semnale) dintr-un singur post. Există trei principii de proiectare: înlănțuit, tabelar și topologic [9]. Principiul înlănțuit, fiind restrictiv, nu se mai utilizează. Principiul tabelar definește dependențele între parcursuri și elementele stației prin tabele, fiind eficient pentru stații mici, dar complicat pentru stații mari [10]. Principiul topologic definește dependențele pe baza modului de conectare a elementelor, fiind mai eficient pentru stații complexe [10] [11]. Diferențele de performanță dintre cele două principii sunt relevante în cazul instalațiilor de centralizare cu rele. Pentru instalațiile electronice se utilizează ambele principii [11].

1.2 Centralizări Mecanice

Primele soluții de centralizare au fost mecanice, utilizând încuietori de macaz și panouri cu știfturi sau tablouri mecanice pentru controlul poziției macazurilor [12][13][14]. Aceste metode au evoluat pentru a permite manevrarea obiectelor din teren dintr-un singur loc, prin pârghii și mecanisme interne similare tablourilor mecanice.

Instalațiile mecanice complexe au dus la dezvoltarea centralizării complete, cu un aparat de comandă central și două aparate de manevră operate de acari. Aparatele de comandă și manevră sunt coordonate prin câmpuri de bloc [12], permițând implementarea unei dependențe mecanice și electrice între elementele stației. Această configurație a fost baza centralizării complete, permițând controlul eficient și sigur al traficului feroviar.

1.3 Centralizări cu Relee

1.3.1 Tranziția mecanic-electric

Tranziția de la acționarea mecanică la cea electrică a macazurilor și semnalelor a fost determinată de limitările centralizărilor mecanice, cum ar fi distanța limitată de comandă și necesitatea de personal fizic capabil. Centralizările electrice, pneumatice și hidraulice au oferit soluții alternative [9], dar centralizările electrice au devenit cele mai răspândite datorită eficienței lor.

1.3.2 Relee – noțiuni generale

Relele sunt componente electronice pasive, formate dintr-o bobină, armătură și contacte. La alimentarea bobinei, se generează un câmp magnetic care atrage armătura, deplasând contactele. Contactele pot fi normal deschise (NO) sau normal închise (NC), în funcție de starea lor la alimentarea bobinei [15].

Relele sunt utilizate pentru a comuta curenți și tensiuni mari cu ajutorul unui curent mic, oferind o soluție eficientă pentru controlul logicii feroviare. Acestea au înlocuit în mare parte componentele mecanice în centralizările feroviare, oferind fiabilitate și eficiență crescută.

1.3.3 Relee feroviare

Relele feroviare sunt special proiectate pentru a rezista condițiilor de operare specifice domeniului feroviar. Acestea includ contacte robuste și protecții împotriva influențelor externe, asigurând o funcționare fiabilă și durabilă [9] [16]. Clasificarea UIC cuprinde următoarele tipuri de rele [16]:

- Relee de tip N (necontrolat) – Aceste rele pot fi utilizate în aplicații de siguranță a circulației fără a necesita verificarea stării acestora. Dimensiunile lor sunt de obicei mari, iar contactele mobile cad întotdeauna la pierderea alimentării prin propria greutate a mecanismelor interne. Ca măsură de protecție suplimentară, vârfurile contactelor mobile și ale contactelor de lucru sunt realizate din materiale care nu pot fi sudate în cazul apariției unor supracurenți, de obicei argint și cărbune.
- Relee de tip C (controlat) – Pot fi folosite în aplicații de siguranță a circulației, dar poziția lor trebuie controlată. Avantajele față de relele de tip N sunt dimensiunile și costurile mai mici. Dezavantajele includ nevoia de verificare a stării lor, implicând utilizarea unui număr mai mare de contacte (20-50%) în comparație cu relele de tip N.
- Relee care nu pot fi folosite în aplicații de siguranță a circulației.

1.3.4 Evoluția centralizărilor cu rele

Centralizările cu rele au evoluat pentru a include sisteme de control și diagnoză avansate, permițând monitorizarea și controlul eficient al traficului feroviar. Acestea au înlocuit treptat centralizările mecanice și au fost implementate pe scară largă în rețelele feroviare moderne. Tipul majoritar de instalații cu rele din România a fost preluat din Uniunea Sovietică [17][18], fiind un urmaș al instalațiilor cu rele dezvoltate de Westinghouse în Statele Unite [19][20].

1.3.5 Instalațiile CR-3

Instalațiile CR-3 reprezintă un tip avansat de centralizare electrodinamică utilizate în România pentru automatizarea și siguranța traficului feroviar. Prima instalație de acest tip a fost implementată în anii 1960, marcând o tranziție importantă de la sistemele mecanice și cu rele simple la sisteme mai complexe și automatizate [21][22].

Instalațiile CR-3 folosesc rele neutre fișă (NF) și rele de cod fișă (CF) pentru diverse funcții de control și monitorizare. Aceste rele sunt configurate în scheme tipizate, fiecare realizând funcții specifice în cadrul sistemului de centralizare [1].

Stabilirea unui parcurs necesită apăsarea succesivă a unui buton de începere (BI) și a unui buton de finalizare a parcursului (BF). Informațiile prelucrate la nivelul schemelor de selecție sunt transmise ulterior schemelor de execuție și sunt memorate la nivelul fiecărei scheme. Condițiile de siguranță sunt monitorizate permanent, iar apariția unei probleme la nivelul oricărei scheme duce la nefuncționarea celorlalte scheme și imposibilitatea de autorizare a parcursului comandat.

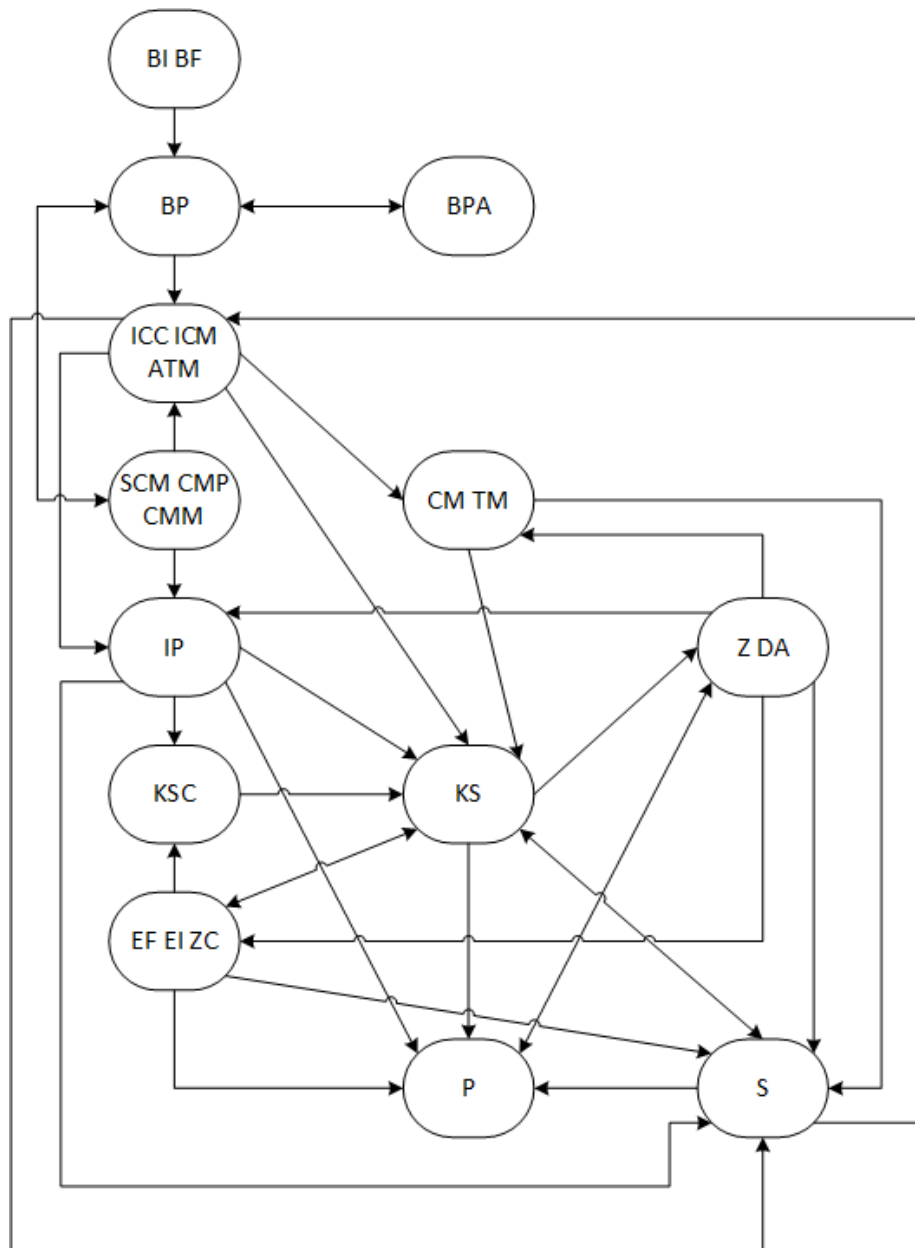


Figura 2. Dependentele schemelor CR-3 [23]

1.4 Centralizări Electronice

1.4.1 Considerente generale

Centralizările electronice reprezintă cel mai avansat tip de instalații de centralizare, utilizând componente electronice avansate pentru a controla și monitoriza traficul feroviar. Acestea oferă un nivel ridicat de automatizare și flexibilitate, permițând integrarea cu alte sisteme de control și diagnoză. Logica feroviară este implementată la nivel de software, spre deosebire de instalațiile cu relee unde logica este implementată prin hardware [10].

1.4.2 Redundanța

Redundanța este un aspect esențial al centralizărilor electronice, asigurând continuitatea operării în caz de defecțiuni. Sistemele electronice sunt proiectate cu multiple niveluri de redundanță, permițând funcționarea neîntreruptă chiar și în condiții de avarie.

Cele mai întâlnite tipuri de structuri redundante utilizate la implementarea centralizărilor electronice sunt 2002 (2 din 2), 2003 (2 din 3) și 2*2002 [9] [10]. Fiecare dintre acestea se folosesc de metode de diversitate hardware și software pentru a implementa funcțiile sistemului de centralizare. Rezultatele obținute de canalele de procesare paralele sunt comparate la final pentru a evalua corectitudinea acestora. În funcție de structura de redundanță, sistemul poate opera într-un mod degradat [9].

1.4.3 Arhitectura centralizărilor electronice

Arhitectura centralizărilor electronice include componente hardware și software avansate, integrate într-un sistem de control complex. Acestea utilizează controlere programabile, senzori și rețele de comunicație pentru a monitoriza și controla traficul feroviar în timp real. Structura unui astfel de sistem este împărțită în trei niveluri principale [9][10]:

- Nivelul operativ: Acesta include posturile locale sau centrale de comandă și control. Este considerat un sistem distinct deoarece funcțiile acestui nivel sunt de obicei furnizate de sisteme externe.
- Nivelul de centralizare: Conține echipamentele care implementează funcțiile de logică feroviară, esențiale pentru gestionarea semnalelor și macazurilor.
- Nivelul de control al elementelor: Realizează conexiunea cu elementele exterioare, cum ar fi macazurile, semnalele și circuitele de cale.

Centralizările electronice permit implementarea unor funcții de diagnoză la toate nivelurile pentru monitorizarea stărilor diferitelor elemente și a sistemului în ansamblu [9]. Aceste instalații permit, de asemenea, interfațarea cu sisteme de protecție ale trenului.

Software-ul pentru instalațiile de centralizare electronică este structurat în mai multe componente [10]:

- Software de bază: Permite componentelor fizice să funcționeze împreună, formând sistemul de operare.
- Software de centralizare: Implementează funcțiile de siguranță necesare instalației, împărțite în funcții generale și funcții specifice pentru fiecare administrator de infrastructură.
- Software de locație: Conține datele specifice zonei centralizate, incluzând elementele exterioare și parcursurile.

Versiunile moderne, de exemplu instalațiile de tip ESTW, ale acestor tipuri de sisteme urmăresc separarea fizică între circuitele de date și cele de alimentare pentru a îmbunătăți siguranța și fiabilitatea.

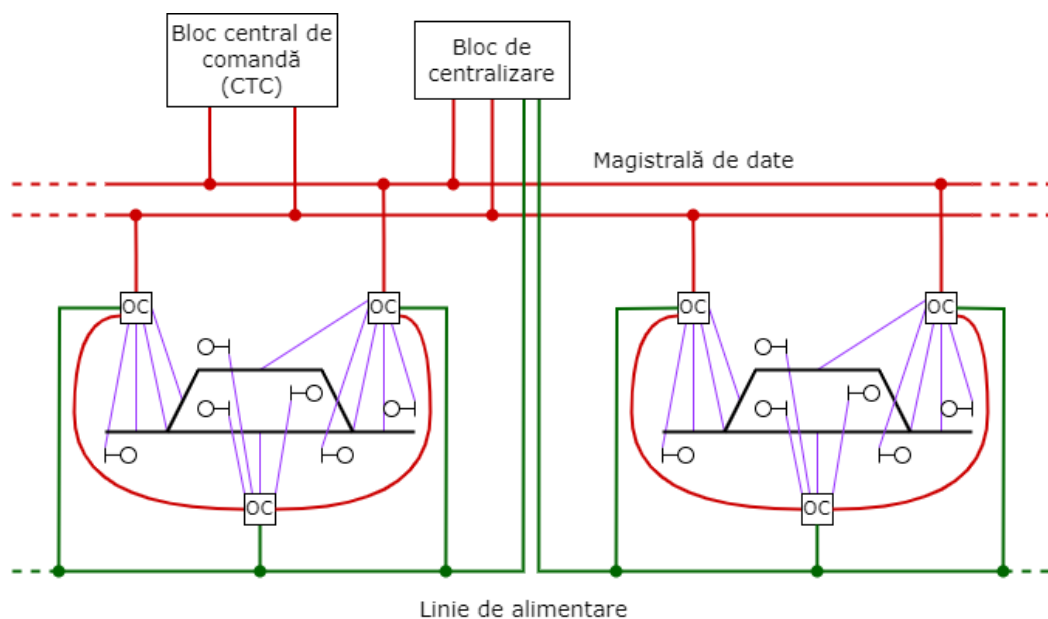


Figura 3. Structura unei instalații ESTW [10]

În momentul actual nu există o standardizare la nivel hardware și software pentru sistemele de centralizare electronică, ceea ce reprezintă un impediment în interfațarea soluțiilor de la diferiți producători [9].

Proiectul EULYNX urmărește standardizarea interfețelor utilizate în domeniul siguranței feroviare pentru a permite combinarea echipamentelor de la diferiți producători fără a compromite condițiile de siguranță. EULYNX își propune să definească un limbaj XML [24] prin care specificațiile clienților, în general administratorii de infrastructură, să fie clar înțelese de producătorii instalațiilor de centralizare și de producătorii elementelor conexe. În prezent, administratorii de infrastructură din 15 țări sunt implicați în dezvoltarea standardului, aflându-se în diferite stadii de implementare națională [25].

1.5 Stadiul Actual al Centralizărilor

Stadiul actual al centralizărilor feroviare reflectă o combinație de tehnologii vechi și noi. În timp ce multe instalații vechi încă sunt în funcțiune, tendința este de a le înlocui treptat cu sisteme electronice moderne. Aceasta tranziție este determinată de necesitatea de a îmbunătăți siguranța, eficiența și fiabilitatea traficului feroviar.

De-a lungul timpului, rețelele feroviare naționale au dezvoltat particularități și provocări specifice, iar o provocare majoră este armonizarea rețelei europene pentru a asigura interoperabilitatea pe o distanță de peste 200.000 km. Analiza realizată în 2020 indică faptul că instalațiile de centralizare mecanice și cu relele sunt încă predominant utilizate, reprezentând 27% și 38% din totalul instalațiilor. Studiul a implicat extragerea datelor din documente oficiale și clasificarea acestora în patru categorii: mecanice, relele, electronice și altele. Datele au fost analizate din 15 țări, reprezentând peste 160.000 km de cale ferată. Rezultatele arată diferențe semnificative între tipurile de centralizare din diverse țări, fără corelații evidente cu dispunerea geografică sau lungimea totală a rețelei. Deși centralizările electronice moderne reprezintă doar un sfert din total, există un trend de înlocuire a vechilor instalații mecanice și cu relele, în special pe coridoarele principale de transport, cu instalații electronice și implementarea sistemului de semnalizare ETCS.

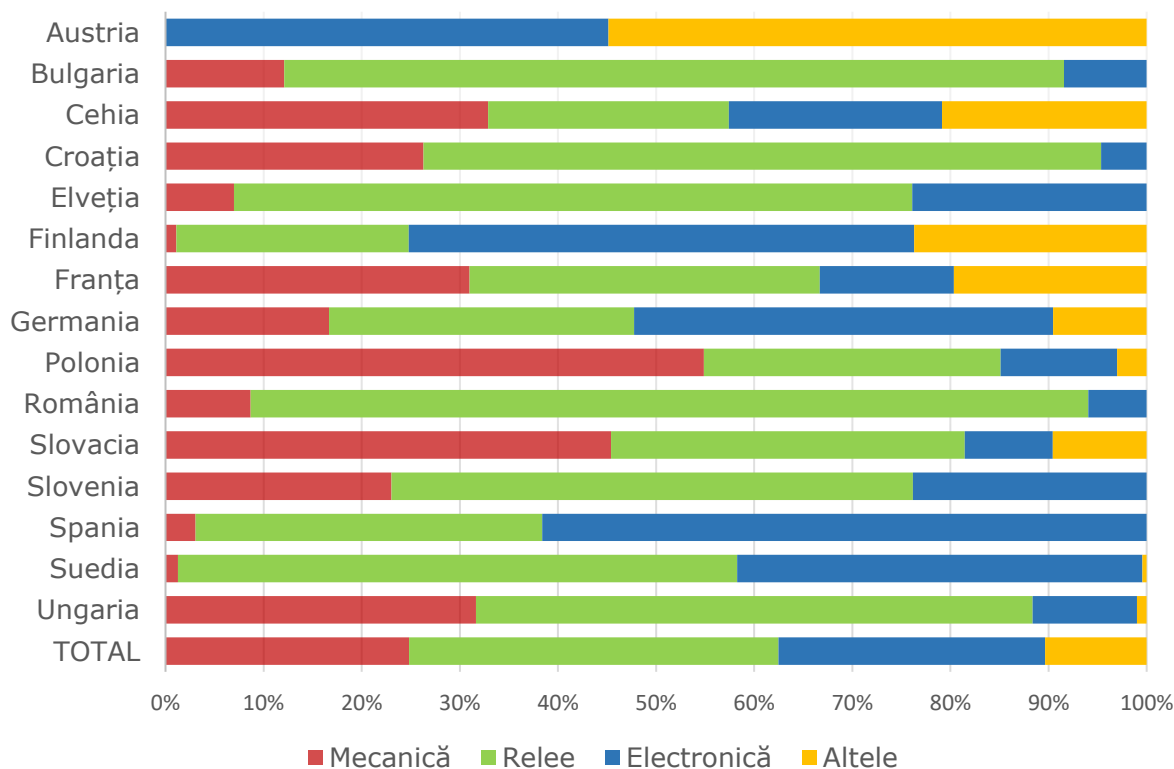


Figura 4. Distribuția tipurilor de centralizări

Capitolul 2. Tehnologii de automatizare

2.1 Rețele de senzori fără fir

2.1.1 Descriere și aplicații generale

Rețelele de senzori fără fir (Wireless Sensor Networks – WSN) sunt sisteme care utilizează un număr mare de senzori distribuiți în diferite locații pentru a monitoriza diverși parametri de mediu sau specifici aplicațiilor. Un nod dintr-o rețea WSN este compus din unul sau mai mulți senzori care monitorizează aceeași zonă și este conectat la alte noduri din rețea. Rețelele pot ajunge până la ordinul miilor de noduri, fiecare având roluri diferite: monitorizare parametri (nod senzor), transmisie de date (nod router) și schimb de date (stație de bază sau nod coordonator) [26].

Structura unui nod senzor include un traductor, un microcontroler, o sursă de alimentare (baterii) și o interfață de comunicație wireless. Microcontrolerul gestionează datele colectate de traductor și le transmite către alte noduri sau stații de bază. Nodurile pot fi echipate cu elemente de localizare și urmărire în timp real, memorii externe pentru stocarea unui volum mare de date sau actuatori pentru funcții de comandă [26]. De asemenea, adăugarea unităților de mobilitate permite deplasarea nodurilor pentru a schimba zona de monitorizare, transformând rețeaua într-o rețea mobilă (Mobile Wireless Sensor Network – MWSN) [27].

Stațiile de bază din rețelele WSN au rolul principal de a facilita comunicarea între nodurile senzoriale și utilizatorul final. Acestea diferă de nodurile senzoriale prin resurse suplimentare de comunicație, alimentare și procesare a datelor [28].

Aplicațiile WSN se clasifică în aplicații de urmărire și monitorizare, utilizate atât în interior, cât și în exterior, în diverse domenii [26]. În domeniul militar, aplicațiile includ urmărirea mișcărilor inamice, evaluarea echipamentelor militare și detectarea atacurilor biologice, chimice sau nucleare. În sectorul medical, WSN monitorizează pacienții și parametrii lor vitali (ex: ritmul cardiac, semnale EKG/EEG, tensiunea arterială, poziția pacientului).

Mediul și agricultura sunt domenii care beneficiază semnificativ de pe urma rețelelor WSN. Monitorizarea calității apei în zonele de alimentare și protejate, calitatea aerului în zonele urbane și industriale, și monitorizarea dezastrelor naturale (incendii, cutremure, erupții vulcanice, tsunami) sunt aplicații esențiale pentru protejarea sănătății și a biodiversității. În agricultură, WSN sunt folosite pentru a monitoriza starea recoltelor, serelor și animalelor pentru a asigura producții cât mai mari și de calitate [29].

În mediul urban, WSN sunt esențiale pentru gestionarea aglomerărilor urbane, monitorizarea traficului, managementul parcarilor și monitorizarea clădirilor cu risc structural. Nodurile senzor pot oferi informații periodice, ca răspuns la un eveniment sau la interogarea de către utilizator. Astfel, rețelele de senzori fără fir sunt soluții versatile și eficiente pentru

monitorizarea și gestionarea diverselor domenii, contribuind la îmbunătățirea calității vieții și a securității.

2.1.2 Topologii de rețele de senzori

Rețelele de senzori fără fir (WSN) au diverse topologii care influențează modul de organizare și conectare a senzorilor, fiecare având avantaje și dezavantaje specifice. Un nod dintr-o rețea WSN poate fi de trei tipuri: coordonator (colectează și agregă datele de la toți senzorii), intermediar (facilitează comunicarea între coordonator și nodurile finale) și final (preia informații din mediul înconjurător și le transmite coordonatorului) [26].

Topologia în stea este cea mai simplă, unde fiecare sensor comunică direct cu un nod central (nod coordonator). Este ușor de configurat și potrivită pentru zone mici, dar nu este scalabilă și poate avea probleme dacă nodul central cedează. Topologia de tip arbore organizează senzorii într-o structură arborescentă, având un nod coordonator și noduri intermediare (routere) [30]. Aceasta este mai scalabilă decât topologia în stea, dar poate suferi de congestie și probleme de rutare dacă structura devine prea complexă. Topologia de tip plasă permite fiecărui sensor să comunice cu mai mulți senzori, oferind redundanță și toleranță la erori, dar este dificil de configurat și necesită mai multe resurse [31].

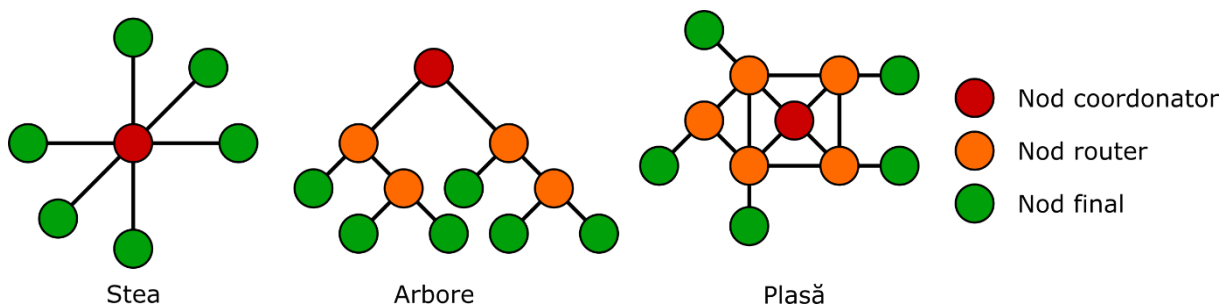


Figura 5. Topologii ale rețelelor WSN

Alegerea topologiei potrivite depinde de cerințele specifice ale aplicației, cum ar fi zona de acoperire, capacitatea de extindere, toleranța la erori și consumul de energie. În rețelele WSN ad-hoc, nodurile se organizează singure și comunică prin rutare multi-hop [32]. În topologiile de grupare, senzorii sunt organizați în cluster cu capete de cluster care agregă și transmit datele, reducând consumul de energie și îmbunătățind eficiența rețelei.

Algoritmii de grupare pot fi statici sau dinamici, cu cei dinamici adaptându-se la schimbările topologice. Exemple de algoritmi de grupare includ LEACH, TEEN, APTEEN, SEP, DEEC și HEED, fiecare având puncte forte și slabe, fiind adecvat pentru diferite tipuri de WSN. Gruparea nodurilor și selectarea capetelor de cluster sunt esențiale pentru eficiența și longevitatea rețelelor WSN [33], [34].

2.1.3 Tehnologii de comunicații pentru rețele WSN

Rețelele WSN pot fi implementate folosind diverse tehnologii de comunicație, fiecare respectând stiva standard de comunicații. Stiva de protocoale WSN, derivată din modelul OSI, este simplificată și cuprinde cinci niveluri: fizic, legătură de date, rețea, transport și aplicație. Fiecare nivel îndeplinește sarcini specifice, independente de celelalte [35].

Tabelul 1. Corespondența dintre stiva OSI și stiva WSN

Stiva OSI	Stiva WSN
Nivel Aplicație	Nivel Aplicație
Nivel Prezentare	
Nivel Sesiune	
Nivel Transport	Nivel Transport
Nivel de rețea	Nivel de rețea
Nivel de legătură de date	Nivel de legătură de date
Nivel fizic	Nivel fizic

Standardul IEEE 802.15.4 (2003) este esențial pentru rețelele LR-WPAN, destinate aplicațiilor cu volum redus de date și consum limitat de energie. Definește nivelurile fizice (PHY) și de control al accesului la mediu (MAC), și include două tipuri de dispozitive: FFD (full-function devices) și RFD (reduced-function devices). FFD-urile pot deveni coordonatori de rețea, în timp ce RFD-urile execută sarcini simple și au resurse limitate [26] [36].

Rețelele ZigBee, bazate pe IEEE 802.15.4, sunt utilizate pentru automatizare și control în medii diverse. Stiva de protocoale ZigBee include nivelurile PHY și MAC (definite de IEEE 802.15.4), și nivelurile de rețea (NWK) și aplicație (APL), specificate de ZigBee. ZigBee permite comunicarea unicast, multicast și broadcast și folosește adrese extinse și prescurtate pentru identificarea dispozitivelor [37] [38].

Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah) este destinat aplicațiilor IoT, oferind conectivitate pe arii extinse și eficiență energetică ridicată. Utilizează benzi de frecvență sub 1 GHz, permițând viteze de până la 347 Mbps [39] și durate de viață ale bateriilor de 5-10 ani. Aceste rețele sunt potrivite pentru măsurarea la distanță, monitorizarea mediului și extinderea acoperirii WLAN.

Alegerea tehnologiei și a topologiei rețelei WSN depinde de cerințele specifice ale aplicației, inclusiv zona de acoperire, capacitatea de extindere, toleranța la erori și consumul de energie.

2.1.4 Aplicații în domeniul feroviar

Datorită cererii crescânde pentru transportul de mărfuri și pasageri, industria feroviară este esențială în sistemele de transport. Condițiile dificile de mediu, fluxul ridicat de persoane și diversele amenințări de securitate impun implementarea unor sisteme moderne și soluții adaptabile. În acest context, aplicațiile feroviare WSN sunt cruciale și se împart în trei mari

categorii: monitorizarea în stațiile de cale ferată, aplicații pentru pasageri și monitorizarea căii de rulare.

În stațiile de cale ferată, WSN poate ajuta la prevenirea incendiilor monitorizând concentrația de monoxid de carbon, particule din aer și temperatura mediului. Sistemele pot fi completate cu camere de luat vederi mobile pentru informații suplimentare. De asemenea, WSN poate monitoriza alte pericole precum inundații, cutremure și atacuri teroriste, activând echipamente precum porți de acces și alarme [40] [41].

Pentru calea de rulare, integritatea șinelor este esențială pentru siguranța transportului. Detectarea timpurie a fisurilor și punctelor slabe previne accidentele. Metodele de evaluare includ senzori ultrasonici și vizuali, de obicei instalate pe platforme mobile [42]. Propunerea de utilizare a WSN de-a lungul căii ferate pentru monitorizare constantă este în curs de evaluare [43].

În cazul elementelor sensibile ale rețelei de cale ferată, aplicațiile bazate pe WSN pot oferi informații despre starea acestora. Topologia specifică pentru WSN de-a lungul căilor ferate este liniară (LWSN) [44], clasificate în subțiri, dense și foarte dense, în funcție de disponibilitatea nodurilor.

Durata de viață limitată a rețelei, datorată alimentării independente a nodurilor, reprezintă un impediment major. Amplasarea strategică a nodurilor și gruparea acestora pot optimiza consumul de energie. O metodă alternativă de alimentare ar putea fi transformarea vibrațiilor din șină în energie utilă [45].

Principalele provocări pentru WSN în calea ferată includ transmisia de date fără fir și consumul de energie. Sistemele de comunicare și control al căii ferate (RCC) folosesc standardul 802.15.4 și sunt concepute pentru a funcționa pe distanțe de peste 50 km, cu viteze de transfer de până la 1 Mbps, chiar și pentru vehicule care se deplasează cu până la 600 km/h [46].

În sistemele RCC, trenurile și echipamentele de cale sunt nodurile finale, iar stațiile de bază servesc drept coordonatori. Rețelele RCC au o topologie hibridă [46], funcționând în topologie stea când nodurile sunt în raza de acoperire a stației de bază și în topologie peer-to-peer în zonele fără acoperire.

2.2 Controllere logice programabile (PLC)

2.2.1 Prezentare generală

Controllerele logice programabile (PLC) sunt echipamente electronice esențiale în automatizările industriale. Inițial, automatizările erau realizate cu relee, dar acestea prezentau dezavantaje majore în ceea ce privește flexibilitatea și necesitatea recablării în cazul modificărilor. PLC-urile, dezvoltate în anii '60, au înlocuit aceste tehnologii, oferind numeroase avantaje, inclusiv fiabilitate crescută, flexibilitate, costuri reduse, funcții de comunicații, timp de răspuns rapid, detectarea facilă a defectelor și testare ușoară.

Comparativ cu microcontrolerele și calculatoarele personale, PLC-urile sunt specializate pentru automatizări industriale, operând în medii dure și având o fiabilitate ridicată [47]. Costurile PLC-urilor sunt ridicate, dar acestea oferă porturi dedicate pentru echipamente industriale și sunt programate conform standardului IEC 61131.

Arhitectura unui PLC include o unitate centrală de procesare (UCP), module de intrare și ieșire, modul de alimentare și modul de programare. PLC-urile pot fi modulare sau integrate, iar UCP-ul este construit în jurul unui microprocesor, având memorie RAM și ROM. Modulele de intrare și ieșire fac legătura cu dispozitivele externe și pot fi amplasate aproape de acestea pentru a reduce cantitatea de cablaj necesară. Aceste module sunt protejate prin optocuploare pentru a izola tensiunile incompatibile.

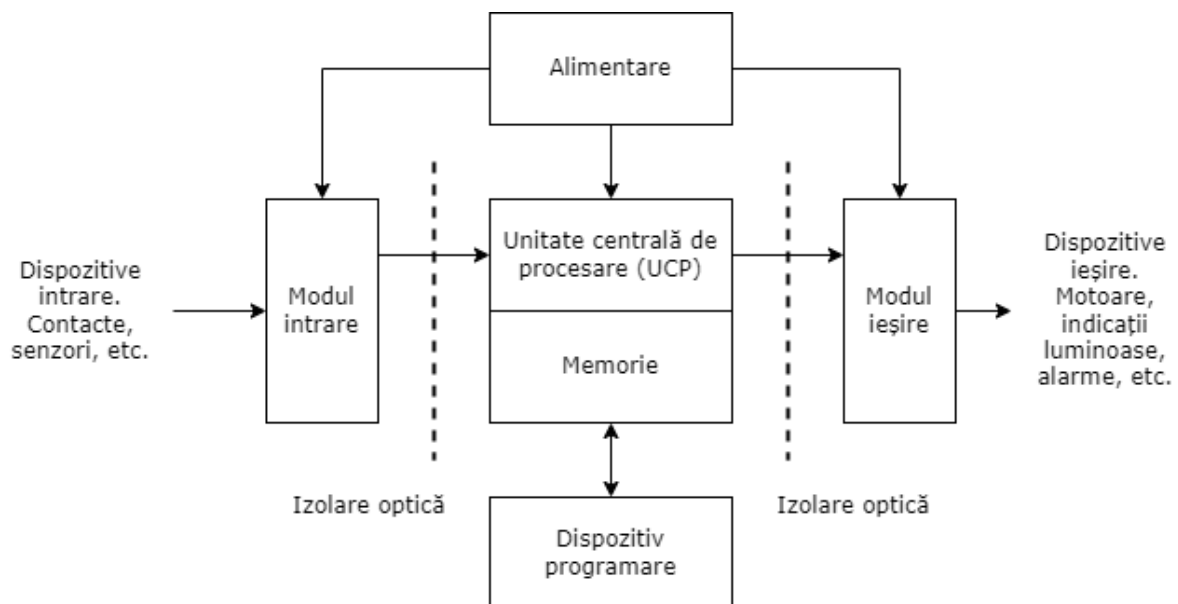


Figura 6. Arhitectura tipică a unui PLC [47]

Specificațiile modulelor de intrare și ieșire includ tensiunea nominală, tensiunile de prag, curentul nominal, temperatura de funcționare, timpul de comutație, tensiunea și curentul de ieșire, curentul de pornire, protecția la scurtcircuit, curentul de scurgere și izolarea electrică.

Modulele analogice sunt caracterizate de numărul de canale, intervalul curentului/tensiunii de intrare și ieșire, protejarea intrărilor, rezoluția și impedanța [47].

Dispozitivul de programare al unui PLC poate fi un terminal mobil sau un calculator cu software specific. Sistemele HMI (interfață om-mașină) sunt utilizate pentru monitorizarea și controlul parametrilor în timpul funcționării, venind sub forma unor ecrane tactile programate separat de PLC.

2.2.2 Programarea PLC-urilor

PLC-urile funcționează pe baza programului încărcat în memoria lor. Modul de desfășurare al programului PLC poartă denumirea de ciclu de scanare și se desfășoară într-o buclă continuă cu următoarele etape [48]:

- Scanare intrări – evaluarea stării intrărilor specificate în tabelul de intrări;
- Rulare program – realizată pe baza datelor din pasul anterior;
- Actualizare ieșiri – actualizarea ieșirilor prin intermediul tabelului ieșiri pe baza rezultatelor obținute din rularea programului;
- Diagnoză și comunicații – evaluarea stării PLC-ului și transmiterea de date către dispozitivele predefinite.

Durata unui ciclu de scanare variază în funcție de numărul de intrări și ieșiri, complexitatea programului principal și performanțele PLC-ului, cu valori tipice cuprinse între 1 și 20 ms [47].

Limbajele utilizate în dezvoltarea programelor pentru PLC-uri sunt definite conform standardului IEC 61131-3. Conform acestui document, există cinci limbaje de programare organizate astfel [49]:

- Limbaje text:
 - Listă de instrucțiuni (LI) – limbaj de nivel scăzut similar limbajului de asamblare;
 - Text structurat (ST) – similar limbajelor PASCAL și BASIC;
- Limbaje grafice:
 - Diagramă bloc funcțională (FBD) – reprezintă fluxurile de date prin blocuri funcționale;
 - Diagramă de funcții secvențiale (SFC) – descrie comportamentul secvențial al sistemului;
 - Diagramă Ladder (LD) – reproduce logica circuitelor cu rele.

Programele pentru PLC-uri sunt, în general, structurate în două părți: fișiere de date, care conțin informațiile legate de intrări, ieșiri, diverse stări și variabile, și din fișierele de program, care conțin programul principal și subrutinele. Subrutinele reprezintă secvențe de program separate care sunt apelate de programul principal în diferite condiții.

2.2.3 Limbajul Ladder

Specificat în standardul IEC61131-3, limbajul Ladder este cel răspândit limbaj de programare al PLC-urilor. Acest limbaj a fost dezvoltat cu scopul principal de a reproduce schemele de automatizare realizate pe bază de rele. Din acest motiv structura și modul de funcționare ale celor două tehnici sunt similare.

Denumirea limbajului provine de la modul de scriere al programelor care are aspectul unei scări (*en: Ladder*) cu mai multe trepte (*en: rung*). Treptele sunt cuprinse între două bare de alimentare și conțin instrucțiuni de intrare și de ieșire.

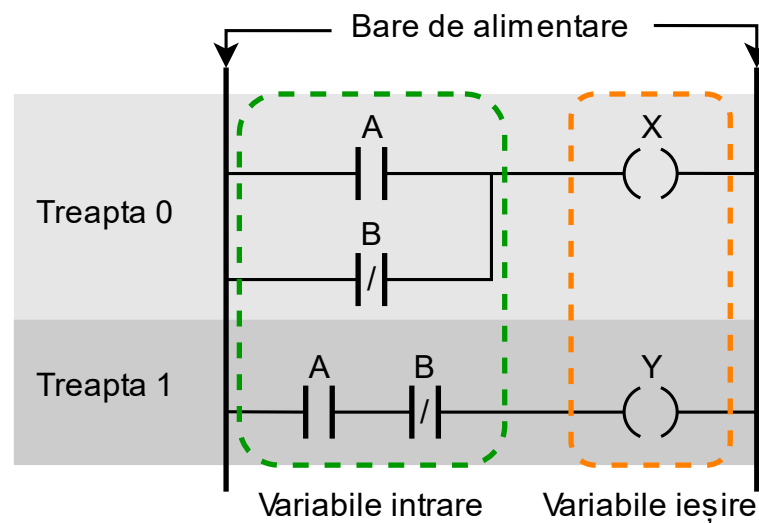


Figura 7. Exemplu de program Ladder

Instrucțiunile de intrare, denumite și contacte, reprezintă variabile care sunt citite și evaluate de către program înaintea executării instrucțiunilor. Există mai multe tipuri de contacte care pot fi utilizate în programele Ladder, principalele tipuri fiind contactele normal deschise și contactele normal închise. Denumirile și funcționarea fiecărui tip de contact se prezintă astfel:

- Contacte normal deschise – starea deschisă corespunde stării logice de 0 (stare implicită), iar starea închisă stării logice 1 pentru variabila asociată;
- Contacte normal închise – starea deschisă corespunde stării logice de 1 (stare implicită), iar starea închisă stării logice 0 pentru variabila asociată;
- Contacte cu detecție a frontului ascendent (Rising edge) – Trece în starea de 1 logic atunci când variabila asociată își schimbă valoarea din 0 în 1, după care redevine 0;
- Contacte cu detecție a frontului descendent (Falling edge) – Trece în starea de 1 logic atunci când variabila asociată își schimbă valoarea din 1 în 0, după care redevine 0;

În funcție de aplicație, într-un program Ladder se pot regăsi contacte diferite ale aceleiași variabile. Utilizarea unui anumit tip de contact depinde de funcția implementată, fiecare comportându-se diferit.

Instrucțiunile de ieșire, denumite și bobine, reprezintă variabilele scrise la după executarea instrucțiunilor din program. Tipurile de bobine folosite în limbajul Ladder sunt:

- Bobine normale – Trec variabila asociată în starea de 1 logic atunci când funcția logică a treptei are ca rezultat valoarea de 1 logic și cu 0 logic în cazul contrar;
- Bobine negate – Trec variabila asociată în starea de 1 logic atunci când funcția logică a treptei are ca rezultat valoarea de 0 logic și cu 1 logic în cazul contrar;
- Bobine de tip set – Trec variabila asociată în starea de 1 logic când funcția logică a treptei are ca rezultat valoarea de 1 logic. Variabila rămâne în această stare și după ce funcția trece în 0 logic, putând fiind schimbată doar prin intermediul unei bobine de tip reset;
- Bobine de tip reset – Trec variabila asociată în starea de 0 logic când funcția logică a treptei are ca rezultat valoarea de 1 logic. Variabila rămâne în această stare și după ce funcția trece în 0 logic, putând fiind schimbată doar prin intermediul unei bobine de tip set;
- Bobine cu detecție a frontului ascendent – Trec variabila asociată în starea de 1 logic atunci când funcția logică a treptei își schimbă valoarea din 0 în 1, după care redevine 0;
- Bobine cu detecție a frontului descendent – Trec variabila asociată în starea de 1 logic atunci când funcția logică a treptei își schimbă valoarea din 1 în 0, după care redevine 0;

Un program Ladder se execută de sus în jos și de la stânga la dreapta, treaptă cu treaptă. Numărul de contacte și linii paralele pentru o treaptă este determinat de caracteristicile de memorie ale PLC-ului [47].

Comportamentul schemelor convenționale cu relee este modelat cu ajutorul logicii booleene. Deoarece limbajul Ladder a fost inspirat de acest tip de circuite, funcțiile ce se implementează în limbaj Ladder pot fi și ele modelate după același principiu.

Simpla implementare a funcțiilor logice nu este suficientă pentru a putea dezvolta aplicații avansate de automatizare. De multe ori acestea necesită temporizarea anumitor procese, contorizarea diferitelor variabile pentru ajustarea parametrilor de funcționare, precum și implementarea de funcții aritmetice complexe. Standardul IEC61131-3 permite implementarea acestor funcții prin blocuri funcționale de tip temporizator, numărător și de selecție[49].

2.2.4 Tehnologii de comunicații pentru PLC-uri

În proiectarea sistemelor de automatizare, este esențial ca senzorii și actuatorii să fie amplasați în apropierea elementelor controlate sau comandate. Modulele de intrare și ieșire

trebuie, de asemenea, instalate aproape de echipamentele asociate pentru a minimiza distanțele și a reduce cablajul necesar. În aplicațiile complexe, elementele sistemului sunt distribuite spațial, ceea ce necesită stabilirea de comunicații între PLC-ul central și modulele de intrare și ieșire amplasate la distanță.

Conexiunile seriale sunt utilizate pentru aceste comunicații, cu două tipuri principale: RS 232 și RS 485. RS 232 este proiectat pentru comunicații punct la punct între două dispozitive pe distanțe de până la 20 m. Necesită trei porturi (Tx, Rx, GND) [50] și utilizează tensiuni asimetrice pentru transmiterea datelor. RS 485 permite crearea de rețele de tip magistrală cu până la 32 de dispozitive și poate acoperi distanțe de până la 1200 m. Utilizează semnale diferențiale transmise prin perechi de fire torsadate, permițând atât comunicații half duplex cât și full duplex [51].

Ethernet devine tot mai popular în sistemele de automatizare, datorită capacității sale de a gestiona traficul prin switch-uri și de a utiliza tehnologia CSMA/CD pentru a evita coliziunile [30]. Ethernet folosește codarea Manchester pentru transmisia datelor și este cel mai răspândit tip de rețea locală (LAN).

Modbus este protocolul cel mai utilizat în automatizările industriale datorită licenței libere de utilizare și a eficienței sale [52]. Modbus RTU funcționează cu standardele RS 232 și RS 485, fiind folosit pentru comunicarea între PLC și echipamente externe. Modbus TCP operează pe rețele TCP/IP și este utilizat pentru comunicarea între PLC-uri sau cu sisteme externe, folosind portul 502.

De multe ori sistemele de automatizare complexe folosesc ambele implementări ale protocolului Modbus. Tranziția dintre implementări se face cu ajutorul unor echipamente denumite gateway-uri. Configurația standard e cea în care Modbus RTU este folosit pentru comunicarea PLC – echipamente externe, iar Modbus TCP pentru comunicarea dintre PLC-uri, calculatoare și servere. Totalitatea tuturor acestor module [47] și componente alcătuiesc un sistem SCADA (Supervisory control and data acquisition).

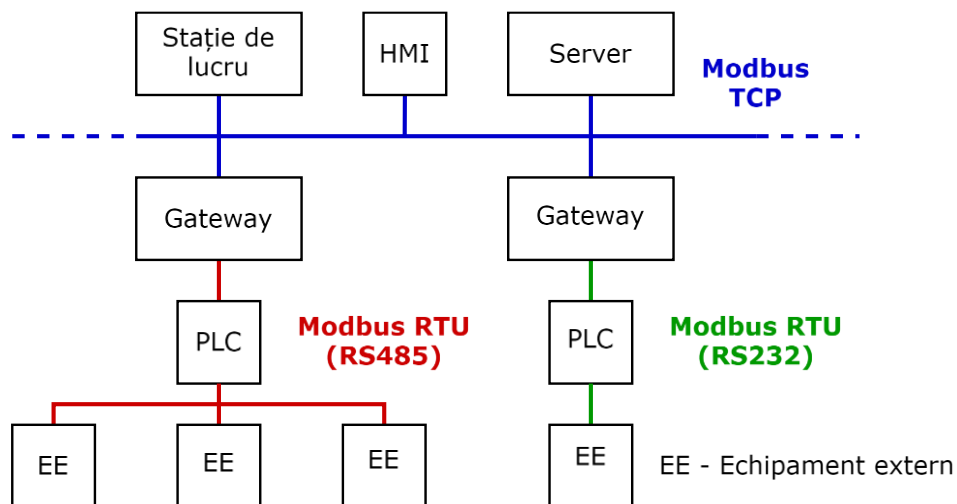


Figura 8. Arhitectura tipică a unui sistem SCADA

2.2.5 Aplicații în domeniul feroviar

Evoluția sistemelor de automatizare industriale și feroviare este similară, însă cerințele de siguranță sunt mult mai stricte în domeniul feroviar. PLC-urile, dezvoltate inițial pentru înlocuirea sistemelor de automatizare cu relee, pot fi utile în automatizările feroviare. Dezvoltarea sistemelor de centralizare și semnalizare feroviară prezintă provocări, inclusiv timpul lung de proiectare, testare și implementare, costurile ridicate și problemele de compatibilitate între produse diferite [53].

Problemele de mentenanță apar odată cu îmbătrânirea sistemelor și încetarea producției echipamentelor specializate, ceea ce face dificilă înlocuirea componentelor defecte [54]. Utilizarea PLC-urilor în automatizările feroviare oferă avantaje precum: experiență în tranziția de la logica hardware la cea software, robustețe în medii dure, modularitate, diversitatea producătorilor și compatibilitatea între echipamente datorită standardelor de comunicații, cum ar fi Modbus.

Eurolocking este un sistem de centralizare electronică bazat pe PLC-uri certificate SIL 4. Sistemul pilot a fost implementat în stația Santpoort Noord (Olanda), controlând semnale, macazuri, circuite de cale și treceri la nivel. Pentru a profita de toate avantajele oferite de PLC-uri, Eurolocking este proiectat în jurul principiului componentelor comerciale la raft (*en: commercial off-the-shelf parts – COTS*) [54], ceea ce înseamnă ca sunt folosite doar module și componente generice, care sunt disponibile de la mai mulți producători.

Arhitectura Eurolocking utilizează diverse protocoale de comunicații [55]: Frauscher Safe Ethernet, SafeEthernet și PROFINET. Sistemul a fost testat în paralel cu vechea instalație cu relee, iar rezultatele au determinat administratorul de rețea să înlocuiască toate instalațiile de centralizare cu relee rămase cu sistemul Eurolocking.

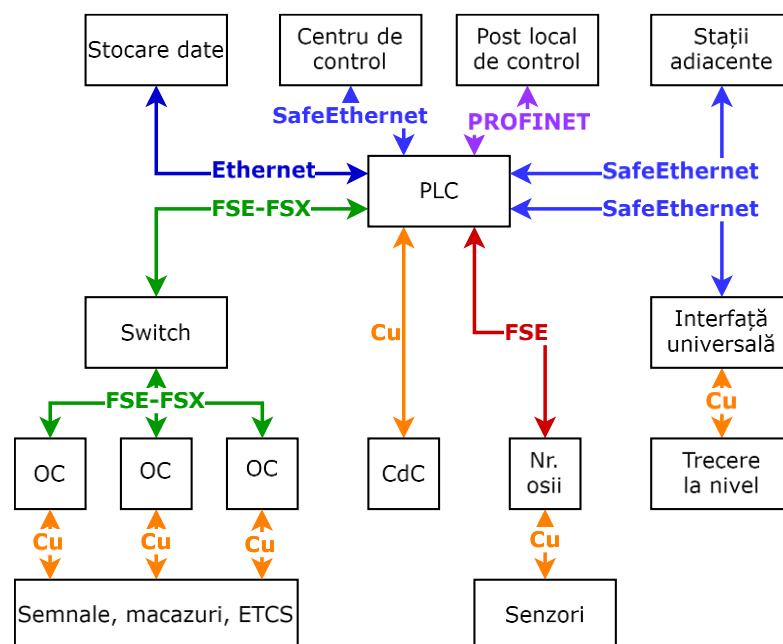


Figura 9. Arhitectura Eurolocking

Capitolul 3. Contribuții privind monitorizarea și diagnoza instalațiilor CED

3.1 Scopul și motivația

În prezenta lucrare se propune implementarea unui sistem de monitorizare și diagnoză a instalațiilor CED. Soluțiile propuse spre implementare în cadrul sistemului sunt evaluate atât din punct de vedere hardware, cât și software.

Sistemele de centralizare sunt principalele elemente de siguranță din domeniul feroviar. După cum a fost prezentat pe larg în capitolele anterioare, aceste sisteme au cunoscut o continuă evoluție. Dacă sistemele de centralizare mecanică o să fie, în mare parte, înlocuite într-un orizont de timp de 15 – 20 de ani, nu același lucru se poate spune și despre instalațiile de centralizare cu relee [56].

Pentru țările cu rețele feroviare extinse și care în prezent au o mare parte dintre instalațiile cu relee încă operaționale, tranziția completă către sisteme electronice este de așteptat să se întindă pe un interval de timp mult mai lung. Prioritare la modernizare vor fi stațiile aflate pe coridoarele principale de circulație. Este foarte posibil ca pe liniile secundare, unde nu există trafic intens, instalațiile cu relee să persiste încă multe decenii.

Pentru stațiile care nu vor fi modernizate într-un orizont de timp foarte apropiat este necesară gândirea și implementare unor soluții de tranziție, care să permită desfășurare circulației în siguranță, fără costuri mari de implementare și mentenanță.

Soluția propusă în această lucrare este concepută ca un sistem suport, care să permită o monitorizare și diagnoză mult mai ușoară a instalațiilor CED. În acest fel se pot identifica și rezolva mult mai rapid deranjamentele din instalație, chiar și de către personalul de mentenanță cu o experiență mai redusă.

Soluția combină partea de monitorizare prin intermediul unei rețele WSN și reproducerea logicii feroviare specifice instalațiilor CED prin intermediul dispozitivelor de tip PLC. După cum a fost detaliat în capitolele anterioare, PLC-urile au înlocuit deja logic cu relee în majoritate proceselor industriale, existând în prezent sisteme de centralizare electronică implementate cu ajutorul lor.

Principalele etape de cercetare parcurse pentru realizarea obiectivelor propuse au fost:

1. Identificarea și evaluarea metodelor de detecție adecvate soluției propuse pentru instalații CED;
2. Adaptarea logicii tradiționale CED în logică software pretabile utilizării PLC-urilor;
3. Dezvoltarea și testarea echipamentelor hardware necesare implementării soluției propuse;
4. Integrarea funcțională a rețelei de monitorizare WSN cu nucleul logic PLC.

3.2 Schema bloc a sistemului de monitorizare și diagnoză

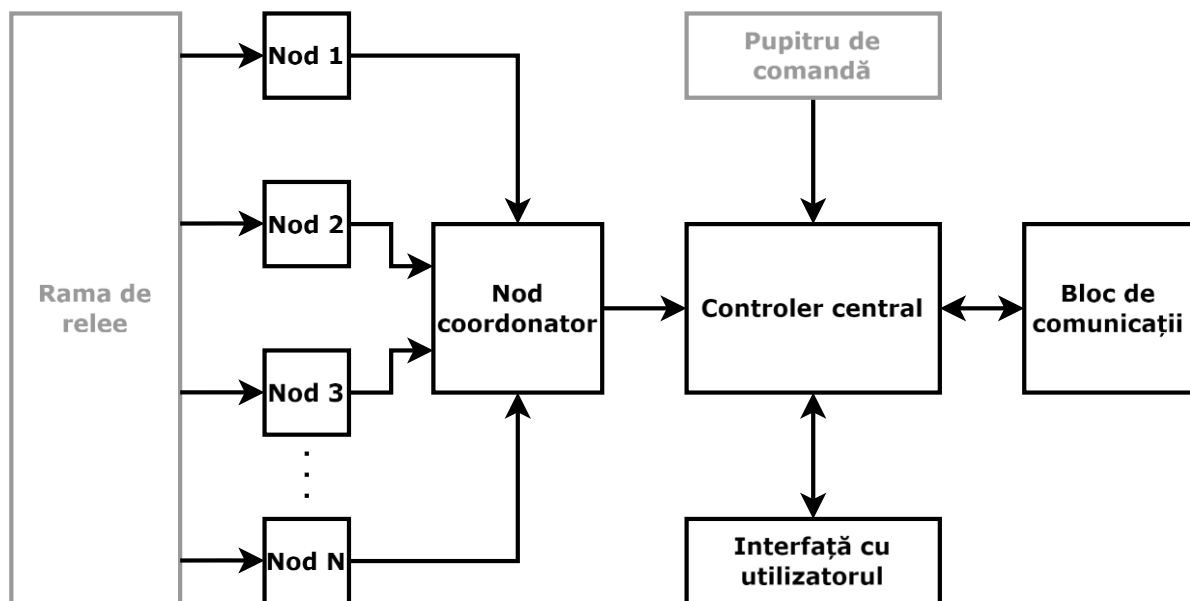


Figura 10. Schema bloc a sistemului

Schema bloc a soluției propuse este ilustrată în Figura 10. Sistemul este compus dintr-o rețea de tip WSN care monitorizează prin tehnici neinvazive starea releelor din rama instalației CED. Nodul coordonator este responsabil de preluarea și interpretarea datelor de la nodurile sensor distribuite pe rama de rele.

În paralel cu monitorizarea releelor feroviare prin intermediul rețelei WSN are loc o monitorizare a comenzilor date de către IDM prin intermediul pupitrului de comandă. Comenzile sunt preluate prin intermediul unui controler central care rulează o replică software a logicii hardware implementate la nivelul instalației CED.

Pe baza comparării celor două fluxuri informaționale are loc o evaluare a modului preconizat de funcționare al instalației (logică virtualizată) față de cel real (prin rețeaua WSN). În cazul funcționării corecte a instalației, cele două fluxuri prezintă aceleași valori. În cazul existenței unor discrepanțe se poate face identificarea acestora la nivel de releu individual. De asemenea se poate implementa o soluție de înregistrarea a istoricului de funcționare.

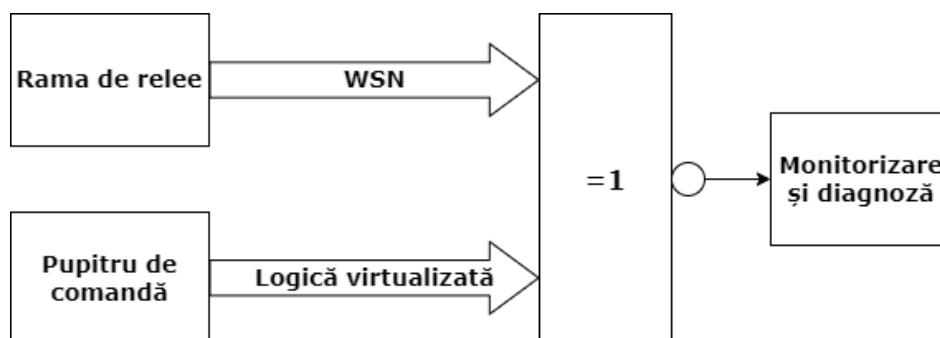


Figura 11. Principalele fluxuri informaționale ale sistemului propus

Un operator uman poate interacționa cu controlerul central prin intermediul unei interfețe speciale. Datele relevante pot fi transmise mai departe către un sistem centralizator la nivel de district sau regională.

3.3 Rama de rele și pupitrul de comandă

Departamentul Telecomenzi și Electronică în Transporturi din cadrul Facultății de Transporturi, UNST Politehnica București se află în posesia unei instalații de centralizare cu rele tip CR-2 produsă în 1961. Instalația este alcătuită dintr-o ramă de rele, un electromecanism de macaz EM-2 și un pupitru de comandă vertical.

Stația centralizată, denumită A, este situată pe o secție de circulație cu linie simplă, având o configurație simplă. Stația (Figura 12.) conține două linii de garare cu un macaz simplu în capătul X și două macazuri conjugate în capătul Y, existând un total de nouă secțiuni izolate. Nu sunt prevăzute semnale de manevră, ci doar de intrare și de ieșire.

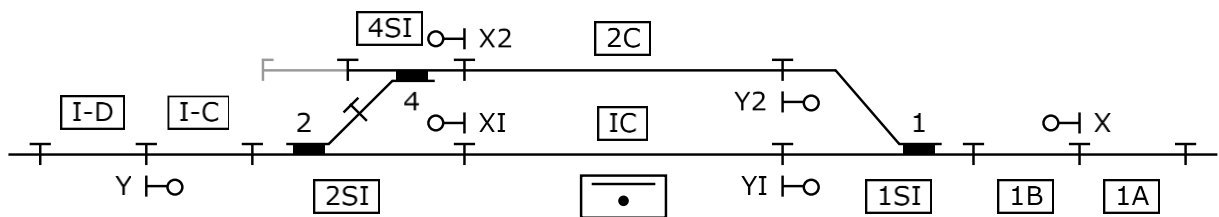


Figura 12. Planul stației A

Instalația este prevăzută cu o singură ramă de rele (Figura 13.) ce conține 77 de rele de tip NF, 24 de rele de cod și câteva rele aferente unui dulap de semnal. Pe un perete adiacent este instalat panoul butoanelor de dezăvorâre artificială.



Figura 13. Rama de rele din dotarea departamentului TET

Pentru a putea realiza instalația folosind o singură ramă de rele, proiectanții acesteia au realizat o serie de modificări față de instalațiile convenționale aflate în exploatare:

- Imposibilitatea realizării parcursurilor de manevră prin absența tuturor semnalelor de manevră;
- Absența secțiunilor semnalelor de manevră aflate după secțiunile semnalelor de intrare, ceea ce implică absența releelor C, KS, P, Z și DA aferente acestora;
- Combinarea funcțiilor releelor Y SA și Y SD într-un singur releu Y S;
- Absența releelor de supraveghere a focurilor de semnal pentru semnalele Y (Y F2G, Y FV1G, Y FRA), YI (YI FRG, YI FVG) și Y2 (Y2 FRG, Y2 FV1G).

Pupitrul vertical de comandă este specific instalațiilor de centralizare de tip CR-2, acesta fiind prevăzut cu o serie de butoane și manete pentru comanda elementelor, precum și cu indicații luminoase pentru controlul lor.



Figura 14. Pupitru CR-2 vertical

Starea secțiunilor izolate și a liniilor de garare e oferită prin trei tipuri de indicații luminoase:

- Trasă stinsă – secțiunea de cale este liberă și nu este inclusă într-un parcurs;
- Trasă albă – secțiunea de cale este liberă și este inclusă într-un parcurs comandat;
- Trasă roșie – secțiunea de cale este ocupată.

Comandarea macazurilor se face prin intermediul manetelor aferente poziționate pe schița stației de pe pupitrul vertical. Manevrarea macazurilor implică poziționarea manetei pe direcția dorită și apăsarea butonului din interiorul manetei. Controlul manevrării corecte a macazului este indicat pe pupitru. Dacă poziția manetei nu corespunde cu cea a macazului din teren, trasa din secțiunea de macaz aferentă poziției greșite se aprinde roșu clipitor.

Butoanele de comandă a semnalelor sunt poziționate pe trasele luminoase. Ele sunt alcătuite dintr-un buton exterior de formă hexagonală și un buton interior. Prin apăsarea

butonului interior se verifică posibilitatea stabilirii parcursului cu pornire de la semnalul respectiv. Dacă toate condițiile de siguranță sunt îndeplinite, trasa parcursului se aprinde în alb. Pentru a trece semnalul pe indicația permisivă se apasă butonul exterior al semnalului. Anularea unui parcurs stabilit se face prin tragerea butonului de semnal de pe pupitru.

Controlul semnalelor se realizează prin indicații luminoase ale unor miniaturi de semnal amplasate pe fața pupitrului de comandă. În cazul semnalului de intrare există trei becuri: verde (indicații permisive), roșu (indicații de oprire) și alb (chemare). Semnalele de ieșire sunt prevăzute cu un singur bec verde care se aprinde pentru indicații permisive, fiind stins pentru cele de oprire. În cazul arderii filamentului aferent focului roșu de semnal, becul verde se aprinde intermitent.

Comandarea unui parcurs prin intermediul pupitrului vertical presupune mai multe etape bine stabilite:

1. Poziționarea manetelor de macaz pe pozițiile corespunzătoare și manevrarea macazurilor prin apăsarea butoanelor din interiorul manetelor;
2. Apăsarea butonului interior de semnal pentru verificarea îndeplinirii condițiilor de siguranță asupra parcursului comandat;
3. Apăsarea butonului exterior de semnal pentru aprinderea focurilor permisive după verificarea condițiilor de siguranță.

Anularea normală a unui parcurs comandat se face prin consumarea acestora secțiune cu secțiune de către tren. Ocuparea secțiunilor de cale se simulează printr-o serie de întrerupătoare situate în partea dreaptă a pupitrului.

Pentru dezăvorârea artificială există un panou suplimentare montat separate cu scopul de a evita acționarea accidentală a butoanelor. Fiecare secțiune de cale prevăzută cu releu zăvor este prevăzută cu un buton de dezăvorâre artificială. Pe același panou, dar grupate separat sunt plasate butoanele de avarie pentru manevrarea macazurilor din stație.

Conectarea tuturor elementelor instalației de centralizare se realizează prin intermediul unor reglete situate în partea de jos a ramei de releu și în partea de jos din spatele pupitrului de comandă. O parte din regletele aferente ramei de releu sunt dedicate distribuției diferitelor tensiuni de alimentare care sunt utilizate în cadrul instalației.

3.4 Controler central

3.4.1 Cerințe generale

Selectarea controlerului central trebuie să țină cont de utilizarea surselor de alimentare existente, asigurarea unui număr adecvat de intrări fizice pentru monitorizarea comenzilor IDM, posibilitatea de a comunica cu nodurile senzor pentru monitorizarea ramei de releu și disponibilitatea unui mediu de programare. Instalațiile CED sunt alimentate cu curent continuu de la o baterie de acumulatori de 24 V cu priză mediană [5], fiind de dorit ca orice controler să

poată fi alimentat cu aceeași tensiune pentru a evita necesitatea blocurilor de alimentare suplimentare.

3.4.2 Portenta Machine Control

Portenta Machine Control (PMC) este un controler industrial produs de către firma Arduino. Acesta aparține gamei de controlere și plăci de dezvoltare Arduino PRO destinate aplicațiilor comerciale de tipul IoT din domeniul industriei, aviației, sănătății, agriculturii, auto și orașelor inteligente.

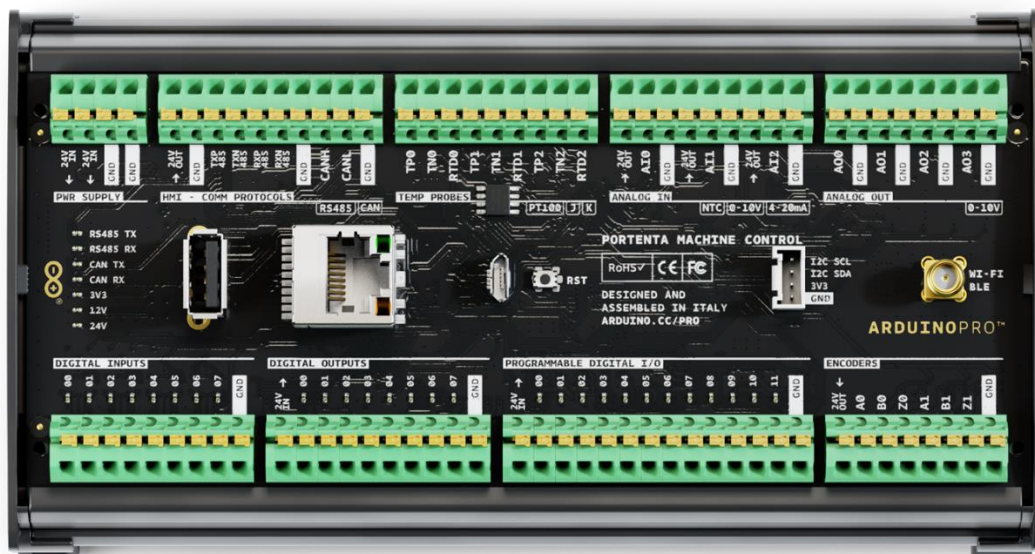


Figura 15. Controlerul Portenta Machine Control [57]

PMC este o extensie a plăcii Arduino Portenta H7, extinzând funcționalitățile acesteia pentru aplicații industriale [58]. Canalele de intrare digitală utilizează un divizor rezistiv pentru a transforma tensiunile 0-24 V în 0-3 V. Canalele de ieșire și programabile au pini de alimentare separați. Dispune de un convertor analog-digital configurabil între 12 și 16 biți, și poate funcționa în rețele CAN de 12 sau 24 V, cu viteze de transfer de până la 5 Mb/s. Programarea se face prin Arduino IDE cu ajutorul bibliotecii *Arduino_PortentaMachineControl.h* [59] sau Arduino PLC IDE.

3.5 Nucleul nodurilor de senzori

3.5.1 Cerințe generale

Fiecare nod sensor trebuie să coordoneze monitorizarea releelor și transmisia datelor, să poată fi interfațat cu senzorii și să permită definirea unei rețele WSN. Dimensiunea compactă și consumul redus de energie sunt cruciale pentru ușoara plasare și autonomia dispozitivului.

3.5.2 Placa de dezvoltare Sparkfun ESP8266 Thing Dev

Placa de dezvoltare ESP8266 Thing Dev produsă de către Sparkfun reprezintă una din soluțiile cele mai utilizate în domeniul dezvoltării aplicațiilor IoT [60].

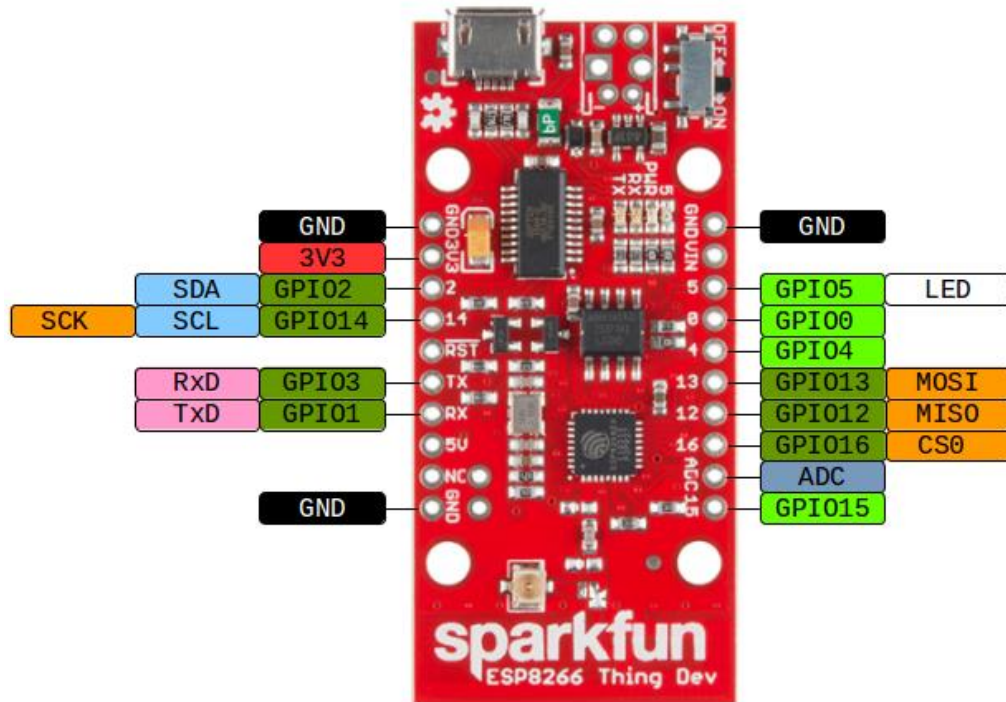


Figura 16. Placa de dezvoltare ESP8266 Thing Dev [61]

Placa de dezvoltare poate fi alimentată prin micro USB (5 V) sau conector extern (3.7-6 V, de obicei acumulatori LiPo). Comunicațiile I2C utilizează pinii digitali 2 (SDA) și 14 (SCL), iar pentru comunicații seriale, pinii Rx și Tx. Magistrala SPI folosește pinii digitali 12 (MISO), 13 (MOSI), 14 (SCK) și 16 (CS) [62]. Placa include o antenă incorporată și un conector U.FL pentru antene externe [63]. Programarea prin Arduino IDE necesită fișiere de configurare adăugate manual.

3.6 Magnetometrul

3.6.1 Principii de funcționare

Senzorii magnetici, utilizați pentru măsurarea schimbărilor câmpurilor magnetice, sunt adesea integrați în magnetometre, precum busola. Cele mai comune tipuri sunt bazate pe efectul Hall și materialele magnetorezistive [64]. Senzorii Hall folosesc o placă subțire de semiconductor, generând o tensiune (V_H) proporțională cu inducția magnetică (B) și curentul care străbate semiconductorul (I).

$$V_H = R_H \left(\frac{IB}{d} \right) \quad (1)$$

Datorită valorilor mici ale tensiunii Hall, sunt necesare circuite suplimentare pentru amplificare [65]. Sensorii Hall pot fi analogici liniari, oferind tensiuni proporționale cu câmpul magnetic, sau digitali, trecând între stări la depășirea unui prag. Sensorii magnetorezistivi își schimbă rezistența în funcție de intensitatea și unghiul câmpului magnetic [64].

3.6.2 Echipamentul utilizat – MAG3110

MAG3110 de la firma Freescale este un magnetometru de tip Hall digital compact cu trei axe. Poate fi folosit în aplicații precum busole digitale, unde se completează cu un accelerometru pe trei axe. Dispozitivul comunică prin intermediul interfeței seriale I2C [66]. Frecvența maximă de citire a câmpului magnetic a acestui senzor este de 80 Hz.

Testarea și evaluarea sistemului s-a realizat cu modulul MAG3110 oferit de Sparkfun [67]. Acesta este proiectat și realizat (Figura 17.) conform indicațiilor producătorului specificate în foaia de catalog a componentei [66].

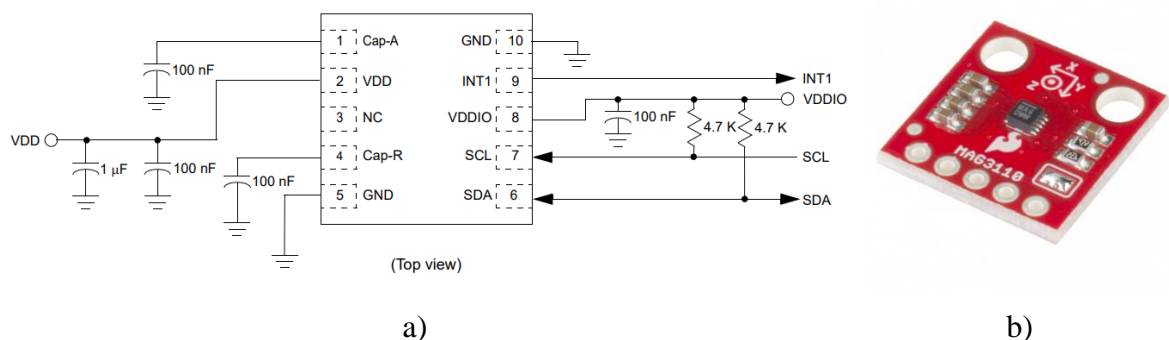


Figura 17. Schema (a) și aspectul (b) modulului MAG3110 [66][67]

3.7 Platforma Arduino IDE

Arduino IDE este o platformă software dezvoltată de Arduino pentru a facilita dezvoltarea aplicațiilor pentru microcontrolere. Utilizată atât de amatori cât și în industrie, platforma folosește un limbaj derivat din C/C++, adaptat pentru interacțiunea cu pinii microcontrolerelor [69]. Programele create, numite "schite" (sketches), au extensia .ino și constau din funcțiile setup() și loop(). Arduino IDE are o interfață grafică simplă și permite programarea diverselor dispozitive prin USB. Funcționalitățile includ descărcarea fișierelor de configurare și biblioteci, precum și monitorizarea în timp real a aplicațiilor prin monitorul serial și monitorul serial grafic.

3.8 Platforma Arduino PLC IDE

Pentru programarea dispozitivelor de tip PLC produse de către firma Arduino poate fi utilizat mediul de dezvoltare Arduino PLC IDE. Versiunea curentă (1.0.3.0) permite dezvoltarea de aplicații pentru PMC și pentru seria de dispozitive Arduino OPTA (Lite, RS485, WiFi).

Arduino PLC IDE are o structură mai complexă decât Arduino IDE, fiind dedicat dezvoltării de aplicații industriale. Interfața (Figura 18.) este structurată în mai multe ferestre și bare de unelte.

Compilare Conectare placă Încărcare program

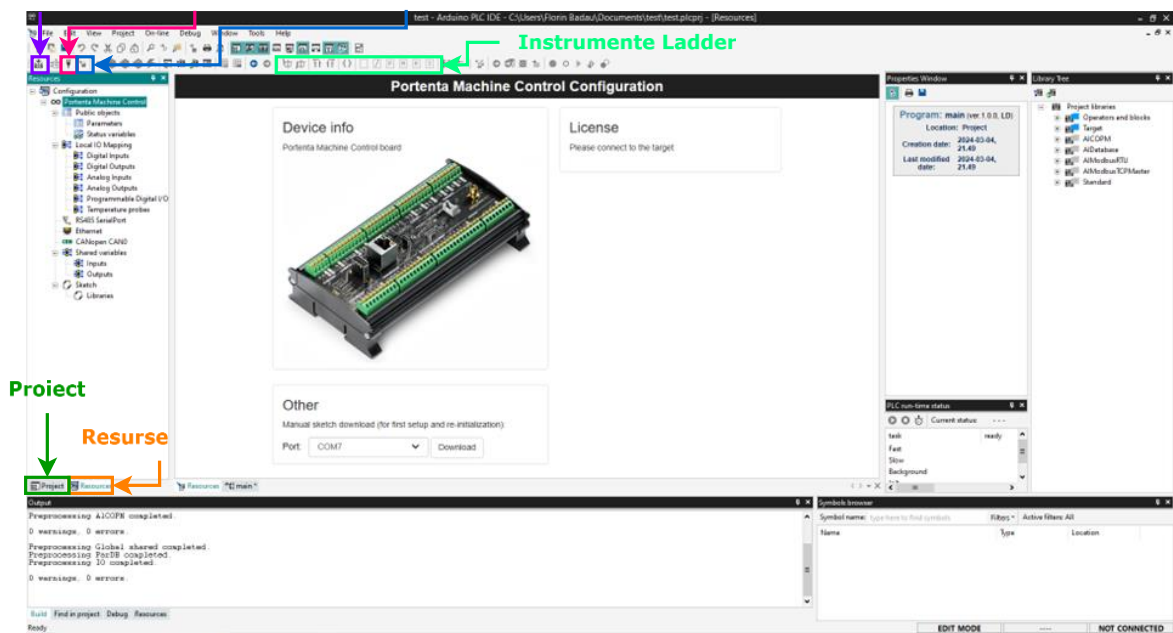


Figura 18. Interfața Arduino PLC IDE

Spațiul de lucru principal se află în stânga interfeței și este structurat în două file: Resources și Project. Fila Resources include funcții pentru PMC, cum ar fi gestionarea obiectelor publice pentru protocolul Modbus, asocierea intrărilor și ieșirilor fizice cu variabile software, configurarea interfeței de comunicații seriale RS485, configurarea Ethernet pentru Modbus TCP și configurarea magistralei CAN. De asemenea, permite gestionarea variabilelor partajate între limbajul Arduino și limbajele PLC.

Fila Project este destinată programelor ce compun aplicația, inclusiv programul principal, programele secundare, variabilele globale și specificarea perioadei de execuție a fiecărui program. Programarea dispozitivelor se realizează prin USB, conectarea software fiind inițializată prin butonul Connect to target, iar încărcarea aplicației se face prin Download PLC Code după compilare. Pentru programele Ladder, există o bară de unelte dedicate pentru inserarea și configurarea contactelor și bobinelor, facilitând dezvoltarea aplicațiilor.

O particularitate a Arduino PLC IDE este posibilitatea de a dezvolta aplicații utilizând atât limbajele standard pentru PLC-uri, cât limbajul Arduino clasic. Cele două moduri de programare sunt folosite pentru funcții diferite. Logica principală a aplicației este implementată prin limbajele standardului IEC 61131-3, în timp ce prin intermediul limbajului Arduino se pot configura și realiza funcțiile de comunicații între PLC și mediul exterior (WiFi, BLE, I2C, etc.).

În dezvoltării aplicației se pot defini variabile partajate (*Shared variables*) de intrare sau ieșire care pot fi folosite atât de către programul PLC, cât și de schița Arduino. În acest mod cele două niveluri ale aplicației pot să realizeze un schimb de informații între ele (Figura 19.).

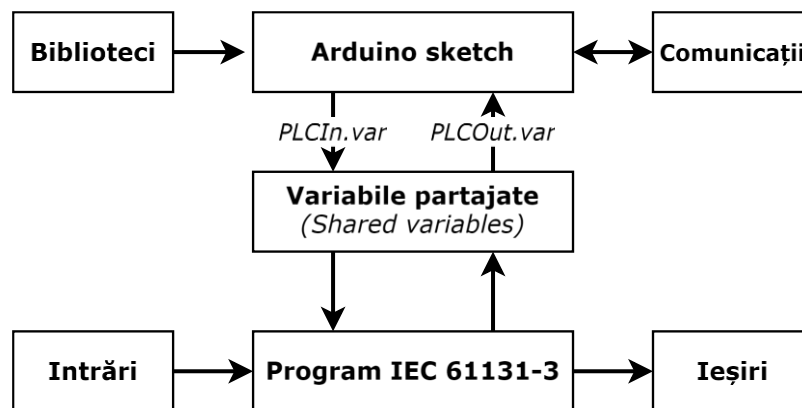


Figura 19. Structura unei aplicații dezvoltate cu Arduino PLC IDE

Variabilele partajate pot fi incluse în programele PLC asemenea variabilelor locale, ele apărând într-o categorie distinctă din fila *Project (SharedVars)*. În schița Arduino sunt utilizate comenzile `PLCIn.num_variabilă` și `PLCOut.num_variabilă` pentru scrierea, respectiv citirea variabilelor partajate [70].

Nivelul de programare în limbaj Arduino permite utilizarea de biblioteci externe pentru implementarea unor funcții specifice. Pe lângă declarare normală de la începutul programului, aceste biblioteci trebuie specificate în tabelul *Libraries* din fila *Resources*. Pe lângă numele bibliotecii este necesar să se menționeze versiunea bibliotecii. Pot fi apelate doar biblioteci listate public pe site-ul arduino-libraries.info [71].

3.9 Dezvoltarea programului de centralizare

3.9.1 *Experiențe anterioare*

În cadrul lucrării de disertație [23] am reușit dezvoltarea unui simulator care să reproducă cu un grad foarte ridicat de acuratețe modul de funcționare al unei instalații de centralizare de tip CR-3. Dezvoltarea a presupus următoarele etape:

1. Întocmirea schemelor aferente instalației de centralizare;
2. Definierea funcțiilor logice pentru fiecare releu în parte;
3. Implementarea funcțiilor logice în mediul de dezvoltare;
4. Testarea sistemului

Dacă prima etapă nu a întâmpinat dificultăți majore datorită existenței ghidurilor și normelor de proiectare ale instalațiilor de centralizare cu relee, etapele ulterioare au prezentat provocări specifice.

Definierea funcțiilor logice asociate fiecărui releu din instalație a prezentat dificultăți în cadrul schemelor complexe, în special a schemelor P cu o structură bifilară. Numărul de termeni necesari stabilirii funcțiilor logice a fost de ordinul zecilor în cazul releelor cu funcții avansate.

Implementarea funcțiilor și dezvoltarea programului de centralizare au fost realizate în LabVIEW. Limbajul grafic de programare a permis reproducerea fidelă a modului de funcționare a unei instalații reale. Dificultățile de implementare au provenit din diferențele mari de reprezentare dintre schemele de centralizare și logica grafică a LabVIEW.

Din experiența dezvoltării acestui simulator s-au desprins o serie de concluzii relevante. În primul rând s-a demonstrat că este posibilă dezvoltarea unui sistem de centralizare electronică respectând structura și logica instalațiilor cu relee de tip CR.

Limitările mediului de dezvoltare au devenit evidente în special în ultimele etape ale dezvoltării prin numărul foarte ridicat de variabile și conexiuni. Imposibilitatea realizării mai multor subprograme a implicat dezvoltarea integrală a logicii de centralizare într-o singură diagramă bloc. Acest fapt a îngreunat modificarea punctuală a softului de centralizare în ciuda organizării zone asociate cu schemele de relee.

3.9.2 *Stabilirea principiilor de dezvoltare*

Asemănările dintre schemele cu relee și limbajul Ladder dedicat PLC-urilor permit traducerea mult mai facilă a logicii cu relee în logică software. Înaintea dezvoltării propriu-zise au trebuit stabilite un număr de reguli de „traducere”.

Schemele cu repetare (IP, EF, Z, DA) pot fi traduse în limbaj Ladder păstrând în mare aceleași structuri și legături.

Releele IP sunt folosite pentru a memora comandarea unui parcurs de la un anumit semnal. Fiecărui semnal, indiferent de tipul său, îi este asociat un astfel de releu. Ele sunt normal căzute și se atrag în momentul comenzii unui parcurs de la respectivul semnal. Revenirea releelor are loc la dezăvorârea secțiunii din spatele semnalului. În cazul stației A (Figura 12.

din 3.3) există un total de șase rele IP. În Figura 20. este ilustrată similaritatea dintre schema cu rele feroviare și programul Ladder.

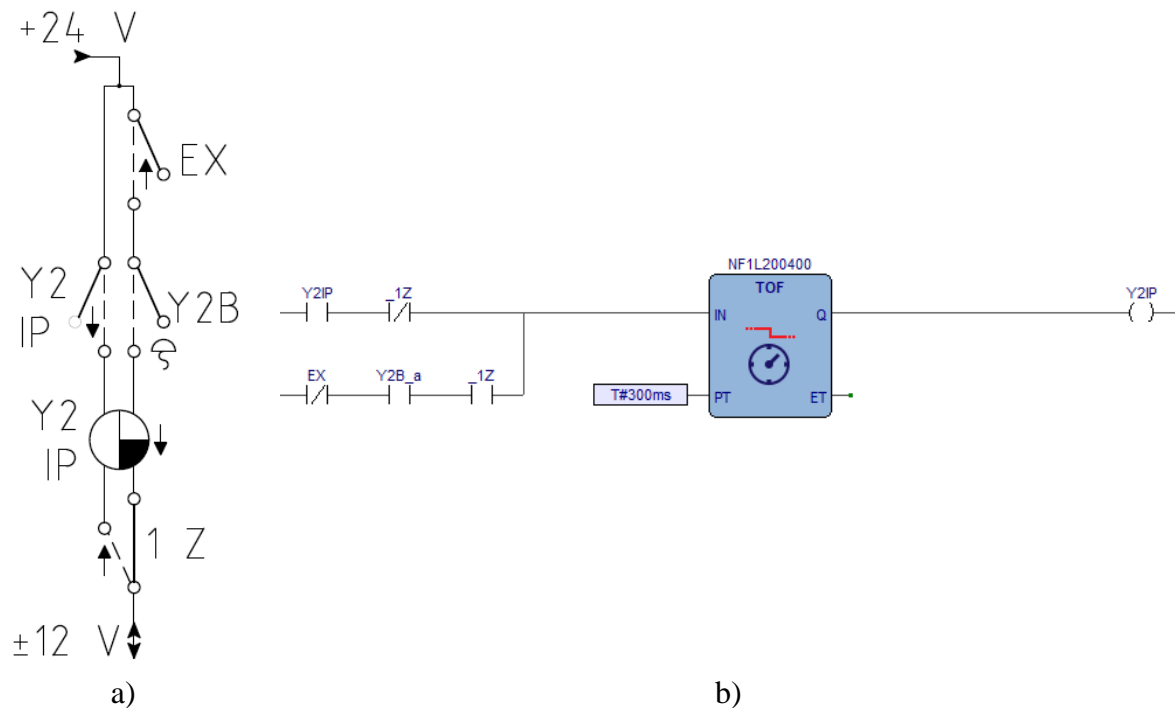


Figura 20. Y2 IP – schemă cu rele (a) și Ladder (b)

Întârzierea de aproximativ 300 ms corespunzătoare releelor NF1L-200/400, care sunt folosite pentru relele IP, este introdusă în limbajul Ladder prin intermediul unui bloc de temporizare la oprire (TOF). Aceasta este singura modificare remarcabilă de adaptare a schemelor cu rele pentru limbaj Ladder, variabila (releul) Y2 IP funcționând în continuare după funcția logică de mai jos.

$$Y2 IP = (\overline{EX} \cdot Y2 B \cdot 1 Z) + (Y2 IP \cdot \overline{1 Z}) \quad (2)$$

Relele EF (excludere frontală) sunt folosite în excluderea parcursurilor incompatibile, fiecărei linii de garare fiindu-i alocat câte un astfel de releu pentru fiecare capăt de stație. Starea lor implicită este atrasă și este schimbată în momentul stabilirii unui parcurs de intrare la linia respectivă. Adaptarea acestor rele în limbaj Ladder nu prezintă adaptări sau introducere de elemente suplimentare.

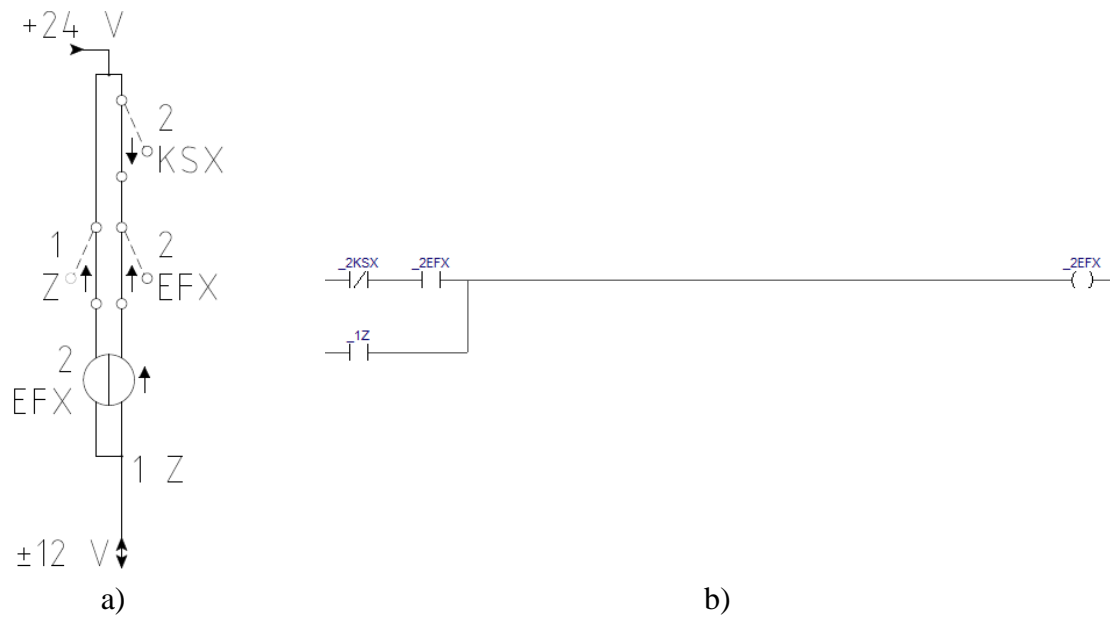


Figura 21. 2 EFX – schemă cu relee (a) și Ladder (b)

Releele Z (zăvoare) sunt utilizate pentru înzăvorârea secțiunilor și macazurilor în stație la stabilirea unui parcurs, menținându-se în stare atrasă și căzând când parcursul este activat. Ele revin la starea atrasă după eliberarea secțiunilor de către tren. Releele DA (dezăvorâre artificială) au rolul de a dezăvorâ secțiunile în caz de înzăvorâre completă, fiind în mod normal căzute și atrase doar la comanda IDM-ului. Acestea revin la starea căzută după încheierea procesului de dezăvorâre. Releele Z și DA funcționează complementar și sunt amplasate în același circuit, fiecare secțiune având o pereche de relee Z – DA.

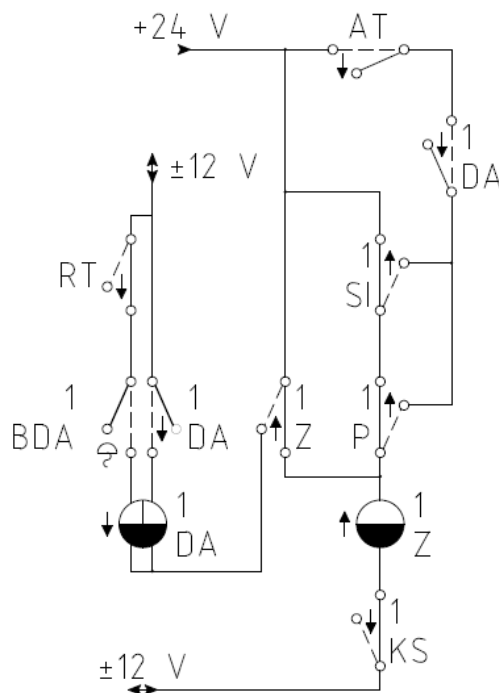


Figura 22. 1 Z și 1 DA – schemă cu relee

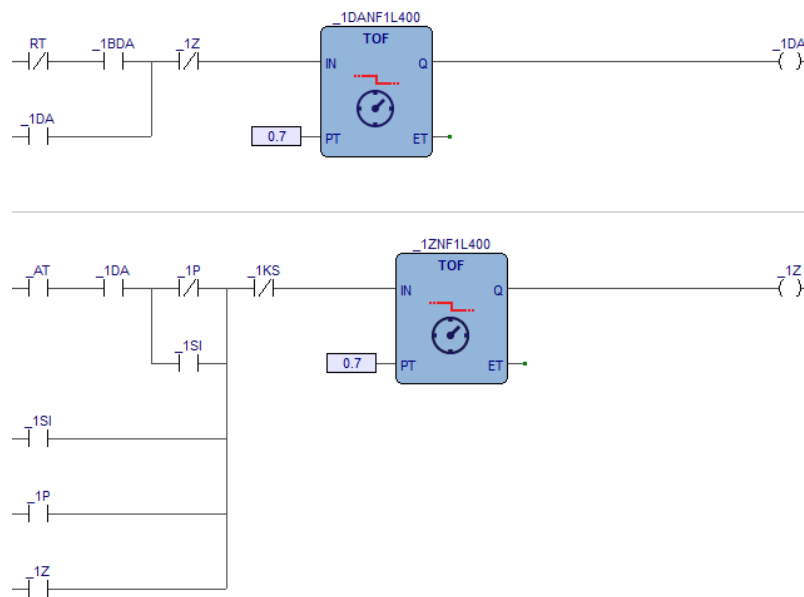


Figura 23. 1 Z și 1 DA – Ladder

Funcția logică a releului Z din Figura 22 a fost simplificată folosind proprietatea de distributivitate și teorema complementelor din algebra booleană, rezultând o expresie mai simplă pentru 1 Z în limbaj Ladder (Figura 23). Funcția logică a releului DA (10) nu necesită simplificări. Atât pentru relele Z, cât și pentru relele DA se folosesc relee NF1L-400, care au o întârziere la cădere de aproximativ 700 ms, și se utilizează un bloc de temporizare la oprire.

Grupul termic este folosit în instalațiile de centralizare cu relee în operațiile de dezăvorâre artificială. În Figura 24. se pot observa cele patru relee care fac parte din grupul termic: T (termic), RT (repetor termic), RDA (repetor dezăvorâre artificială) și AT (ajutător termic).

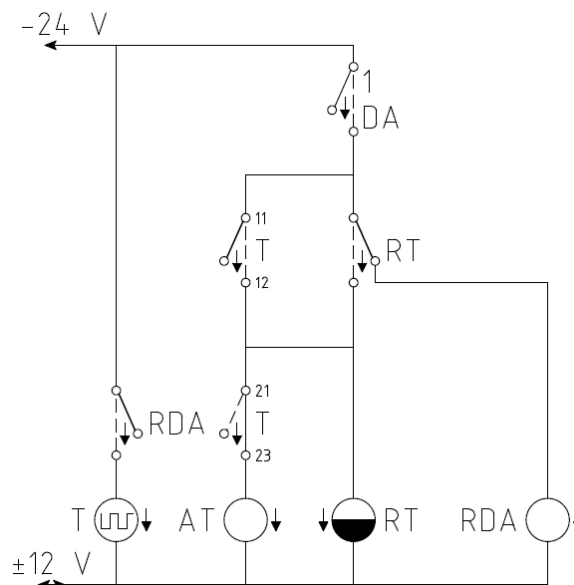


Figura 24. Schema grupului termic

Starea normală a tuturor releelor din grupul termic este căzută, ele schimbându-și starea pe parcursul executării dezăvorării artificiale. Releul RT este de tip NF1L-400, ceea ce îi oferă o temporizare la cădere de 700 ms, în timp ce releele AT și RDA sunt de tip NF1-800.

Releul T este un releu de tip TL-2 care prezintă o construcție și un mod de funcționare diferit față de cel al releelor NF sau cod fișă. Contactul de lucru (11-12) se închide la aproximativ 90 de secunde de la alimentarea releului, în timp ce contactul de repaus (21-23) se închide după același interval de timp de la pierderea alimentării. Această temporizare este implementată prin fabricarea contactelor din materiale cu un coeficient de dilatare la temperatură diferit [1].

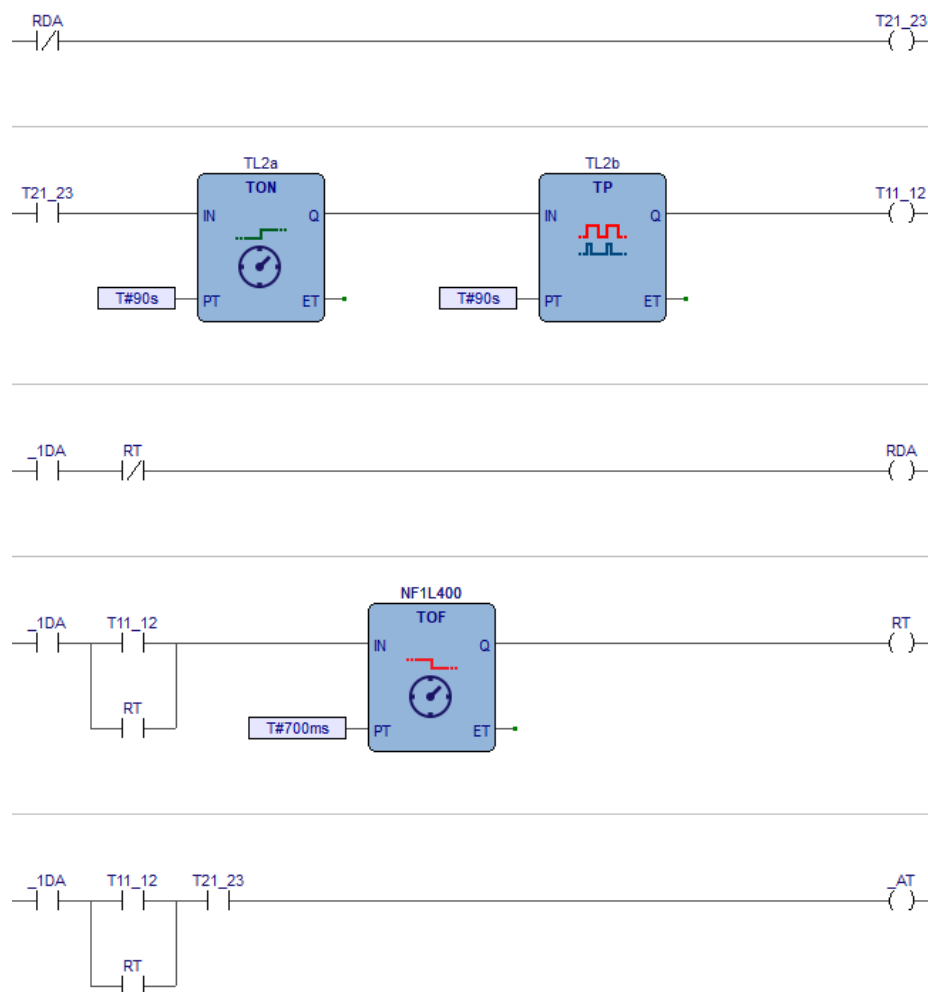


Figura 25. Implementarea grupul termic în Ladder

Schemele geografice de centralizare (KSC, KS, P, S) au o structură mai complexă decât schemele tipizate, ceea ce prezintă o provocare pentru implementarea logicii Ladder. Schemele geografice sunt alcătuite din elemente tipizate de schemă (semnale de intrare, semnale de ieșire, secțiuni izolate, secțiuni de cale, etc.). Din punct de vedere electric ramurile schemelor geografice pot fi încadrate în:

- Ramuri de garare:
 - Subramuri de intrare
 - Subramuri de ieșire
- Ramuri de externe
 - Subramuri de intrare
 - Subramuri de ieșire
- Ramuri comune

Deși este posibilă definirea funcțiilor în același mod în care au fost definite pentru schemele precedente, această abordare prezintă un dezavantaj prin repetarea structurilor comune de schemă. Din Figura 26. se observă cum circuitele de atragere ale releelor 1 KS și IB KS au foarte multe elemente în comun cu circuitele de atragere ale celorlalte rele.

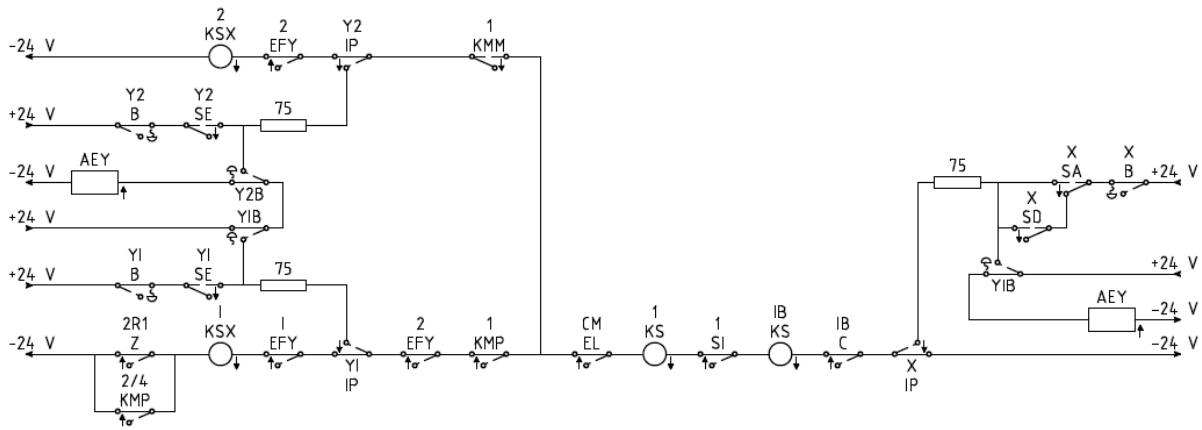


Figura 26. Schema KS a stației A (capătul X)

Partajarea elementelor de circuit este reflectată și prin funcțiile logice asociate releelor din schemă. În formule (3-5) s-a făcut distincția dintre pozițiile de apăsare (A) și tragere (T) ale butoanelor de semnal.

$$2 K S X = 2 E F Y \cdot \overline{Y 2 I P} \cdot 1 K M M \cdot C M E L \cdot 1 S I \cdot I B C \cdot X I P \cdot \left(X B_A + \left((X S D \cdot \overline{X S A}) + X S A \right) \cdot \overline{X B_T} \right) \quad (3)$$

$$1 K S X = (2 R 1 Z + 2 / 4 K M P) \cdot 1 E F Y \cdot \overline{Y I I P} \cdot 2 E F Y \cdot 1 K M P \cdot C M E L \cdot 1 S I \cdot I B C \cdot X I P \cdot \left(X B_A + \left((X S D \cdot \overline{X S A}) + X S A \right) \cdot \overline{X B_T} \right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 1 \text{ KS} = \text{IB KS} = & \left((2 \text{ EFY} \cdot \overline{\text{Y2 IP}}) \right. \\
 & + \left(\text{Y2 IP} \cdot ((\overline{\text{Y1B}_A} \cdot \text{Y2IB}_A) + (\overline{\text{Y2 B}_T} \cdot \text{Y2 SE})) \right) \cdot 1 \text{ KMM} \\
 & + ((2\text{R1 Z} + 2/4 \text{ KMP}) \cdot \text{I EFY} \cdot \overline{\text{Y1 IP}}) \\
 & + \left((\text{Y1B}_A + (\overline{\text{Y1 B}_T} \cdot \text{Y1 SE})) \cdot \text{Y1 IP} \right) \cdot 2 \text{ EFY} \cdot 1 \text{ KMP} \Big) \cdot \text{CM EL} \\
 & \cdot 1 \text{ SI} \cdot \text{IB C} \\
 & \cdot \left(\overline{\text{X IP}} + \left(\text{X IP} \cdot \left(\text{XB}_A + \left(((\text{X SD} \cdot \overline{\text{X SA}}) + \text{X SA}) \cdot \overline{\text{XB}_T} \right) \right) \right) \right)
 \end{aligned} \tag{5}$$

Implementarea directă a acestor funcții în Ladder ar genera trepte de program cu multe variabile. În cazul programelor de centralizare pentru stații de dimensiuni medii și mari, complexitatea acestor funcții crește prin adăugarea de variabile suplimentare, ceea ce ar îngreuna și mai mult traducerea acestora în Ladder.

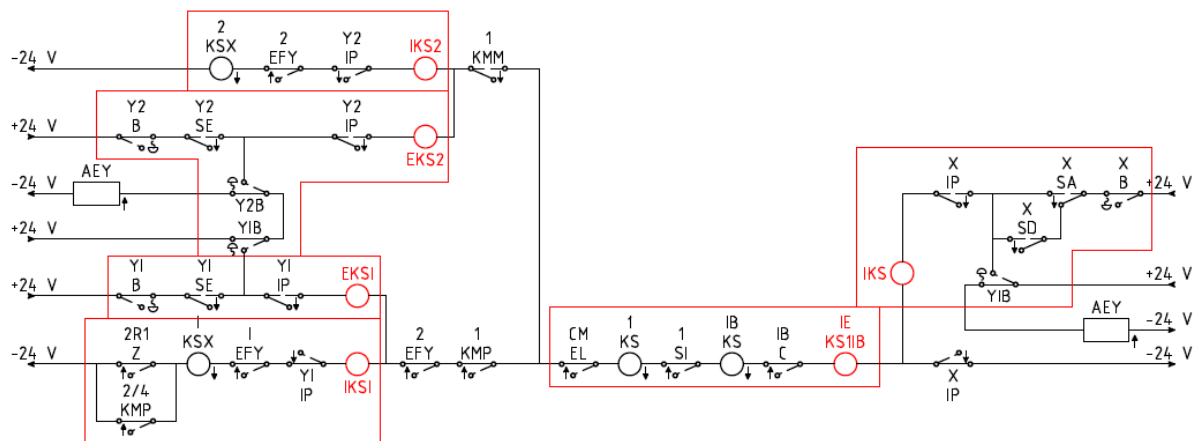


Figura 27. Introducerea variabilelor (releelor) totalizatoare pe ramură

Pentru segmentele comune de schemă, și prin extensie de funcții, se pot introduce variabile de tip totalizator de ramură (Figura 27.). Acestea indică îndeplinirea condițiilor de pe respectiva ramură și pot fi folosite, la rândul lor în definiția variabilelor principale.

Denumirea variabilelor a fost stabilită ținând cont de subramurile aferente (I – intrare, E – ieșire, IE – comun) și de elementele considerate definitorii pentru acestea (linii de garare, secțiuni comune, semnale de intrare). În cazul schemei KS exemplificată anterior s-au definit șase variabile totalizatoare (6-8).

$$\text{IKS2} = 2 \text{ EFY} \cdot \overline{\text{Y2 IP}} \tag{6}$$

$$\text{EKS2} = \text{Y2 IP} \cdot ((\overline{\text{Y1B}_A} \cdot \text{Y2IB}_A) + (\overline{\text{Y2 B}_T} \cdot \text{Y2 SE})) \tag{7}$$

$$\text{IKS1} = (2\text{R1 Z} + 2/4 \text{ KMP}) \cdot \text{I EFY} \cdot \overline{\text{Y1 IP}} \tag{8}$$

$$E K S I = (Y I B_A + (\overline{Y I B_T} \cdot Y I S E)) \cdot Y I I P \quad (9)$$

$$I E K S I B = C M E L \cdot 1 S I \cdot I B C \quad (10)$$

$$I K S = X I P \cdot \left(X B_A + \left((X S D \cdot \overline{X S A}) + X S A \right) \cdot \overline{X B_T} \right) \quad (11)$$

Definind în primă fază variabilele totalizatoare, este posibilă simplificarea funcțiilor releelor principale (12-14).

$$2 K S X = I K S 2 \cdot 1 K M M \cdot I E K S I B \cdot I K S \quad (12)$$

$$1 K S X = I K S I \cdot 2 E F Y \cdot 1 K M P \cdot I E K S I B \cdot I K S \quad (13)$$

$$1 K S = I B K S = \left((I K S 2 + E K S 2) \cdot 1 K M M \right) + \left((I K S I + E K S I) \cdot 2 E F Y \cdot 1 K M P \right) \cdot I E K S I B \cdot (\overline{X I P} + I K S) \quad (14)$$

În cazul stației A definirea tradițională a funcțiilor logice conform schemelor electrice presupune o dependență a celor patru rele KS de 83 de variabile. Prin folosirea variabilelor totalizatoare sunt introduse șase variabile noi cu o dependență de 24 de variabile, în timp ce funcțiile releelor KS pot fi echivalate ținând cont de 29 de variabile. Prin utilizarea acestei tehnici se obține o reducere a necesarului de variabile cu 37%. În cazul schemelor asociate unor stații de dimensiuni medii și mari, numărul necesar de variabile supravegheate scade la jumătate.

De multe ori în instalațiile de centralizare cu rele necesarul de contacte din scheme depășește numărul de contacte disponibile la un singur releul. În aceste cazuri se folosesc rele repetitive care reproduc starea releului principal, ceea ce crește numărul de contacte disponibile. Variabilele software nu prezintă limitări din punct de vedere al numărului de utilizări. În cazul variabilei IKSI definită anterior (8), implementarea în limbaj Ladder a folosit direct variabila 2Z.

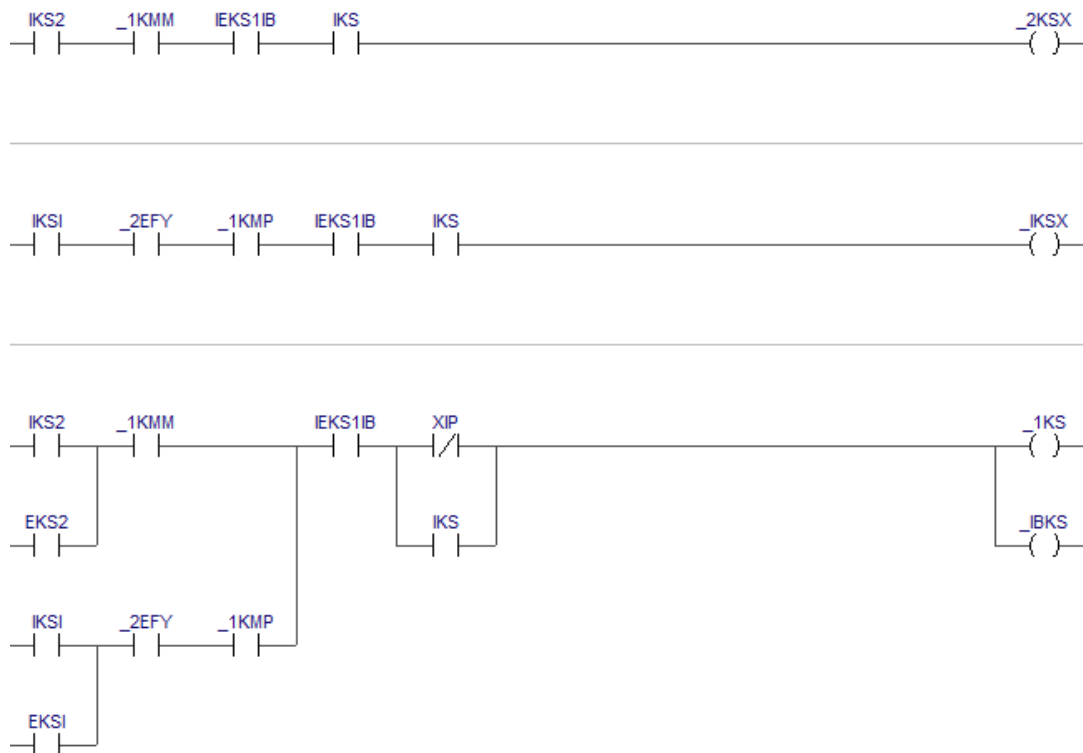


Figura 28. Schema KS în Ladder

Rolul principal al schemei KS este de verificare a condițiilor de siguranță necesare efectuării parcursului comandat. Printre acestea se numără poziționarea corectă a macazurilor, starea de liber a secțiunilor din parcurs și excluderea parcursurilor incompatibile. Informația din schema KS este preluată de către schema S prin intermediul căreia se verifică înzăvorărea secțiunilor din parcurs, starea lămpilor de semnal și se comandă semnalele din teren.

Releele care aparțin schemelor S prezintă, asemenea releelor KS, părți de circuit comune care pot fi reprezentate prin definirea unor variabile totalizatoare. Astfel, cele patru releee principale au fost definite în funcție de ele.

În acest caz se pot defini variabile totalizatoare (Figura 29.) pentru semnalul de intrare (SIX) și pentru secțiunile 1SI și IB (SIE1IB). Expresiile acestor variabile sunt descrise mai jos (31-32), precum și funcțiile releelor S ținând cont de variabilele totalizatoare (33-36).

$$SIX = (XB \cdot XFRA) + (X FV1G \cdot ((X SA \cdot XF2G) + X SD)) \quad (15)$$

$$SIE1IB = IB KS \cdot IB DA \cdot IB Z \cdot 1 KS \cdot 1 DA \cdot 1 KS \quad (16)$$

$$\begin{aligned} X SD = SIX \cdot 1KMP \cdot X IP \cdot SIE1IB \\ \cdot ((1 KM \cdot \overline{Y1 IP} \cdot \overline{1 EF\bar{X}} \cdot 1 KSX \cdot IC) \\ + (\overline{1 KM} \cdot \overline{Y2 IP} \cdot \overline{2 EF\bar{X}} \cdot 2 KSX \cdot 2C)) \end{aligned} \quad (17)$$

$$X SA = SIX \cdot \overline{1KMP} \cdot X IP \cdot SIE1IB \cdot ((1 KM \cdot \overline{Y1 IP} \cdot \overline{1 EFX} \cdot I KSX \cdot IC) + (1 KM \cdot \overline{Y2 IP} \cdot \overline{2 EFX} \cdot 2 KSX \cdot 2C)) \quad (18)$$

$$Y1 SE = (Y1 SE + Y1B) \cdot Y1 IP \cdot 1 KM \cdot \overline{X IP} \cdot SIE1IB \cdot IAC \cdot ISX \quad (19)$$

$$Y2 SE = (Y2 SE + Y2B) \cdot Y2 IP \cdot \overline{1 KM} \cdot \overline{X IP} \cdot SIE1IB \cdot IAC \cdot ISX \quad (20)$$

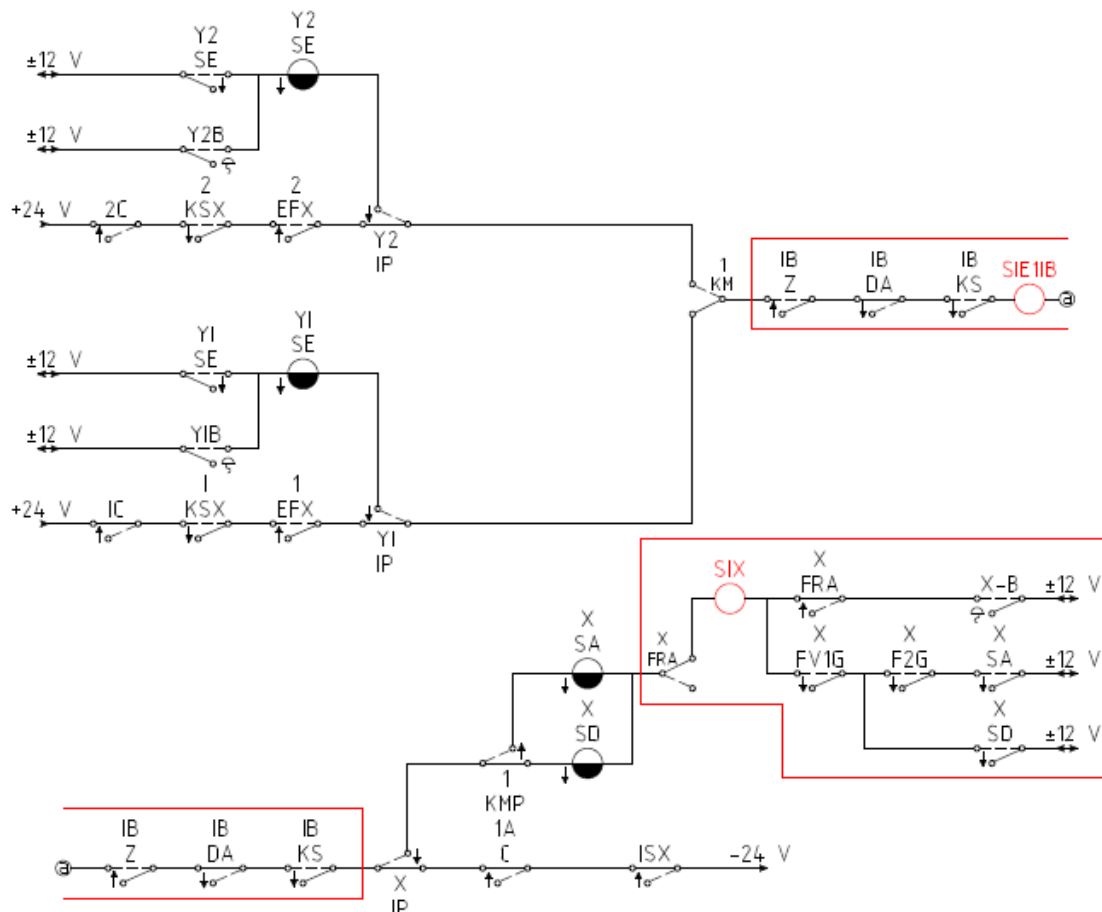


Figura 29. Amplasarea variabilelor totalizatoare în schema S

Cea mai complexă schemă a unei instalații de centralizare de tip CR este schema P. Rolul principal al releelor din această schemă este de înzăvorâre permanentă a secțiunilor de cale precum și de dezăvorâre secvențială (secțiune cu secțiune) pe măsura consumării parcursurilor. Pentru implementarea acestor funcții, circuitul fiecărui releu P (aferent unei singure secțiuni) prezintă mai multe ramuri de alimentare. Releul ZAIX este util în cazul înzăvorârilor pentru parcursuri de trecere prin stație.

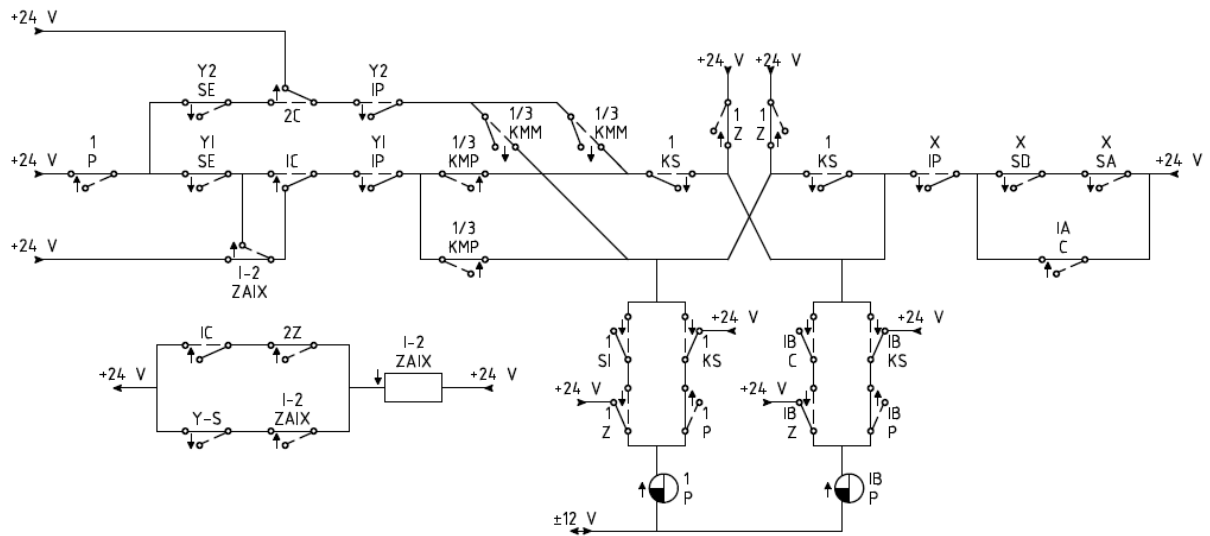


Figura 30. Schema P a stației A (capătul X)

Pentru stația A se pot defini două variabile totalizatoare: PX pentru parcursurile de intrare și PI2 pentru parcursurile de intrare sau ieșire. Funcțiile logice ale variabilelor sunt redată mai jos (40-43), precum și funcțiile reduse ale variabilelor principale (44-45). Implementarea acestora în Ladder este ilustrată în **Error! Reference source not found.** și **Error! Reference source not found.**

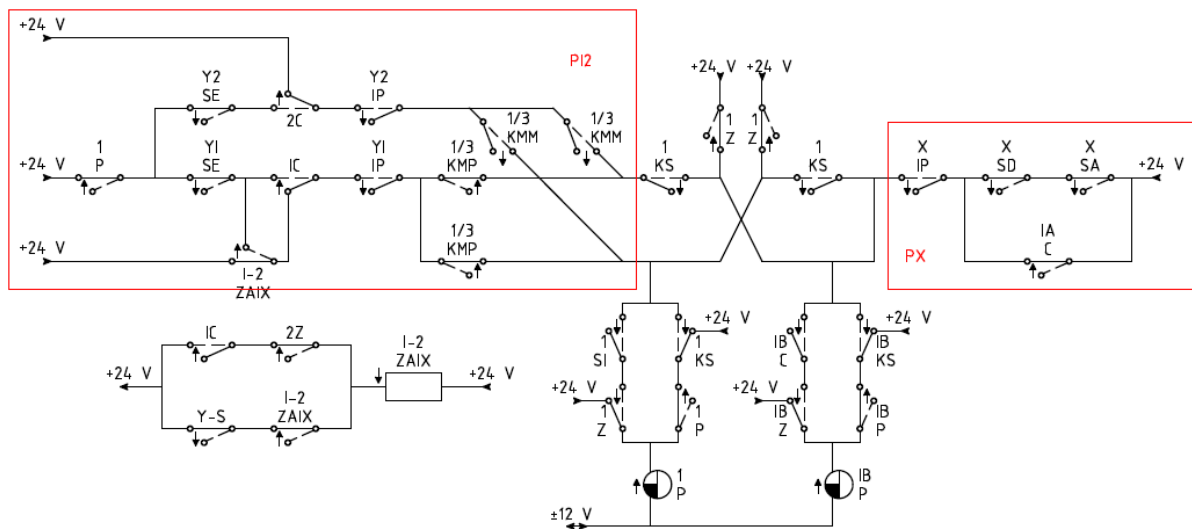


Figura 31. Amplasarea variabilelor totalizatoare în schema P

$$\begin{aligned}
 PI2 = & \left(1 KMM \cdot Y2 IP \cdot (2C + (\overline{2C} \cdot \overline{Y2 SE} \cdot 1 P)) \right) \\
 & + \left(1 KMP \cdot Y1 IP \right. \\
 & \cdot \left(\left((IC \cdot \overline{ZAI\bar{X}}) + \overline{IC} \right) \cdot \overline{Y1 SE} \cdot 1 P \right) + (IC \cdot ZAI\bar{X}) \left. \right)
 \end{aligned} \tag{21}$$

$$PX = X IP \cdot (IAC + (\overline{XSD} \cdot \overline{XSA})) \quad (22)$$

$$1P = 1Z + (\overline{1P} \cdot \overline{1KS}) + \left(((\overline{1Z} \cdot \overline{1SI}) + (\overline{1P} \cdot \overline{1KS})) \cdot (IBZ + (IBKS \cdot PX) + PI2) \right) \quad (23)$$

$$IBP = IBZ + (\overline{IBP} \cdot \overline{IBKS}) + \left(((\overline{IBZ} \cdot \overline{IBC}) + (\overline{IBP} \cdot \overline{IBKS})) \cdot (PX + 1Z + (1KS \cdot PI2)) \right) \quad (24)$$

Pentru respectarea straturilor de procesare a informației, fiecare dintre schemele detaliate anterior sunt definite ca programe independente din cadrul aceluiași proiect Ladder. Structura generală a proiectului pentru stația A este prezentată în Figura 32.

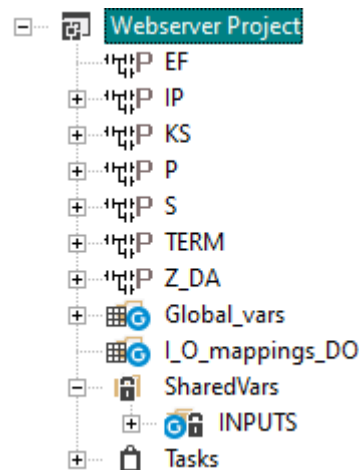


Figura 32. Structura generală a proiectului Ladder

Variabilele principale ale programului sunt cele care corespund releelor din schemele tradiționale de tip CR. Deoarece acestea intervin în mai multe scheme (programe în Ladder) simultan, ele sunt definite ca variabile globale. În acest fel ele pot fi accesate de toate programele proiectului.

Variabilele totalizatoare, introduse pentru a simplifica simularea schemelor, au utilitate doar în interiorul schemei respective. Din acest motiv ele sunt declarate ca variabile locale, care pot fi folosite doar de către programul în interiorul căruia sunt definite.

Programele prezentate până acum, cu excepția grupului termic, corespund schemelor din capătul X al stației A. În programele Ladder apar însă și variabile asociate celui alt capăt de stație. În cazul acestora s-au definit valorile implicite de adevărat sau fals pe baza schemelor în care se regăsesc.

3.9.3 Configurări de comunicații

După cum a fost menționat în subcapitolul 3.8, funcțiile de comunicații ale dispozitivului PMC sunt implementate prin intermediul limbajului clasic de dezvoltare Arduino. În cazul sistemului propus, PMC servește ca nod coordonator al unei rețele WSN.

Configurarea PMC ca nod central s-a realizat prin setarea acestuia ca punct de acces WiFi folosind biblioteca WiFi.h și definirea parametrilor inițiali. Punctul de acces se creează la inițializare și rămâne activ permanent. Dacă eșuează, PMC transmite un mesaj pe interfața serială. Nodurile sensor se conectează la acest punct de acces folosind biblioteca ESP8266WiFi.h, cu date de conectare declarate ca pointeri constanți. Comunicarea dintre noduri și nodul coordonator se face prin protocolul UDP, folosind biblioteca WiFi.h pentru PMC și WiFiUdp.h pentru nodurile sensor. Mesajele includ ID-ul nodului și inducția magnetică pe axa Z, formate ca "ID:inducție_z". Mesajele sunt compuse și transmise de nodurile sensor la adresa IP a coordonatorului, 192.168.3.1, și descompuse folosind simbolul ":" ca delimitator.

```
int packetSize=Udp.parsePacket();//detecteaza dimensiune mesaj
if (packetSize) {
  int len = Udp.read(buf, 255);//salveaza mesajul
  if (len > 0) {
    buf[len] = 0;
  }
  //Descompunere mesaj cu salvare a valorilor
  String data=buf;
  IDnod = data.substring(0, data.indexOf(':')).toInt();
  ind_z = data.substring(data.indexOf(':') + 1).toFloat();

  sens_read(nodeID, fx);
}
```

Ultima funcție din secvența anterioară este folosită pentru a interpreta datele recepționate de la nodurile sensor și pentru a modifica variabilele programului Ladder în concordanță cu acestea. Pentru evaluarea performanțelor sistemului descrisă în subcapitolul 4.2 funcția a fost implementată pentru patru noduri sensor.

Capitolul 4. Testarea și validarea datelor

4.1 Monitorizarea releelor feroviare prin magnetometre

4.1.1 Considerente teoretice

Modul de construire și funcționare al releelor de uz general, precum și al celor folosite în aplicațiile feroviare au fost detaliate în prima parte a lucrării. În cazul tuturor tipurilor de relee elementul esențial pentru funcționarea acestuia este bobina. Bobinele, alături de rezistoare și condensatoare, alcătuiesc grupul componentelor pasive care sunt esențiale tuturor aplicațiilor electronice.

Pentru a putea utiliza magnetometrele în monitorizarea releelor feroviare a fost necesară o modelare prealabilă a comportării câmpurilor magnetice generate de către bobinele releelor, urmată de măsurători de laborator pentru a evalua condițiile reale de funcționare.

Parametrul caracteristic al unei bobine este inductanța. Aceasta reprezintă proprietatea electrică a unei componente de a se opune schimbării de sens a curentului electric prin aceasta. Pentru o bobină tipică inductanța are următoare formă [65]:

$$L = N \frac{\Phi}{I} [H] \quad (25)$$

unde N reprezintă numărul de spire al bobinei, Φ fluxul magnetic generat de bobină și I curentul care circulă prin bobină.

Asemenea multor câmpuri din fizică, câmpul magnetic este un câmp vectorial. Orice punct din interiorul acestuia este caracterizat printr-o mărime și direcție de către vectorul B , denumit și inducție magnetică. Câmpurile magnetice pot fi ușor studiate privind formele acestora și modificările produse în interiorul lor de către diferite elemente (bobine, magneți, obiecte metalice, etc.). Vectorul B este folosit la reprezentarea acestor linii de câmp magnetic, unitatea de măsură folosită pentru inducția magnetică fiind Tesla [74]. În cazul unei suprafețe de arie A , inducția magnetică este definită ca fiind:

$$B = \frac{\Phi}{A \cos \theta} [T] \quad (26)$$

unde θ reprezintă unghiul format de fluxul magnetic Φ și perpendiculara pe suprafața A în punctul de calcul.

Inducția magnetică este strâns legată de intensitatea câmpului magnetic (H) prin relația:

$$B = \mu_0 \mu_r H [T] \quad (27)$$

unde μ_0 reprezintă permeabilitatea magnetică a vidului, iar μ_r permeabilitatea magnetică relativă a mediului.

Pentru un solenoid (bobină fără miez feromagnetic) de lungime finită ℓ alcătuit din N spire de diametru d , intensitatea câmpului magnetic din centrul său poate fi exprimată sub forma [75]:

$$H = \frac{NI}{\sqrt{\ell^2 + d^2}} \xrightarrow{d \ll \ell} \frac{NI}{\ell} \text{ [A/m]} \quad (28)$$

În cazul unui solenoid inducția magnetică va prezenta componente exclusiv de-a lungul axei ce trece pe lungime prin mijlocul acestuia. Dacă această axă este denumită Ox , inducția magnetică de-a lungul acesteia respectă regula [74]:

$$B_x = \frac{\mu_0 N I r^2}{2(x^2 + r^2)^{3/2}} \text{ [T]} \quad (29)$$

unde x reprezintă poziția de-a lungul axei Ox , cu originea în centrul solenoidului, iar r raza unei bucle.

În cazul bobinelor multistrat inducția de-a lungul axei Ox depinde atât de raza internă (r_i), cât și cea externă (r_e) [76]:

$$B_x = \frac{\mu_0 N I}{2\ell(r_e - r_i)} \left(A \ln \frac{r_e + \sqrt{r_e^2 + A^2}}{r_i + \sqrt{r_i^2 + A^2}} + B \ln \frac{r_e + \sqrt{r_e^2 + B^2}}{r_i + \sqrt{r_i^2 + B^2}} \right) \text{ [T]} \quad (30)$$

unde:

$$A = \frac{L}{2} - x \quad (31)$$

$$B = \frac{L}{2} + x \quad (32)$$

4.1.2 Modelarea releelor feroviare

Modelarea magnetică a releelor feroviare a fost realizată folosind Python și pachetul Magpylib, care permite modelarea sistemelor magnetice complexe prin definirea de magneți, conductori de curent și surse diverse. Magneții pot avea forme variate, cum ar fi paralelipiped dreptunghic, cilindru, segment de cilindru, sferă, tetraedru și plasă triunghiulară. Conductori de curent includ bucle și linii din segmente multiple, iar sursele diverse includ dipoli, triunghiuri

cu densitate de sarcină uniformă și surse personalizate. Sensorii măsoară câmpul magnetic în poziții specifice. Până la versiunea 4, Magpylib nu utiliza complet unități de măsură standard SI, ceea ce putea duce la erori. Versiunea 5 a remediat acest aspect, conformându-se complet cu standardul SI. Modelarea câmpului magnetic al bobinelor releelor feroviare necesită definirea elementelor componente ale sistemului magnetic, cu dimensiuni tipice prezentate pentru bobinele NF utilizate în instalațiile de centralizare cu relee, având un miez de oțel silicios cu diametrul de 1,6 cm.

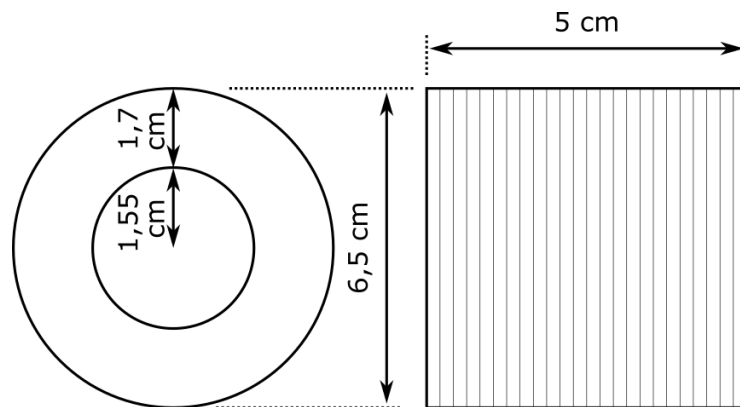


Figura 33. Dimensiunile bobinelor utilizate în releele NF cu două bobine [78]

O parte din parametrii releelor (diametrul conductorului, numărul de spire, rezistența bobinelor) a fost preluată din standardele existente [1]. Curentul a fost calculat pe baza rezistenței bobinelor, a configurației preferate pentru conectarea bobinelor și a tensiunii normale de alimentare (12 V).

Pentru o modelare cât mai realistă este nevoie de determinarea numărului exact de straturi (S_L) și spire pe strat (N_S) necesare realizării bobinelor. Acestea se pot aproxima ținând cont de dimensiunile carcsei de bobinare (ℓ_C – lungime, a_C – adâncime) și de diametrul conductorului folosit pentru bobine cu tot cu izolația acestuia (d_C).

$$S_L = \frac{a_C}{d_C} [\text{straturi}] \quad (33)$$

$$N_S = \frac{\ell_C}{d_C} [\text{spire/strat}] \quad (34)$$

În cazul bobinelor releelor NF se pot considera valorile $\ell_C = 4,6$ cm și $a_C = 1,3$ cm. Acestea diferă ușor de valorile ilustrate în Figura 33. prin scăderea a 4 mm aferenți marginilor carcsei de bobinare. Pentru bobinele releelor NF1-800 conductorul folosit are un diametru total de aproximativ 0,25 mm [65], cei doi parametrii având valorile de $S_L \cong 50$ și $\ell_C \cong 180$.

Secvența de cod de mai jos prezintă modul de definire al unei bobine (L13) de releu NF-800 ținând cont de parametrii din **Error! Reference source not found.** și de parametrii calculați ulterior.

```
#Definire colectie Magpylib cu eticheta "coil13"
coil13 = magpy.Collection(style_label="coil13")
#Bucla pentru definirea straturilor bobinei (50)
for n in np.linspace(1,50,50):
    #Bucla pentru definirea spirelor de pe un singur strat (180)
    for z in np.linspace(0, 46, 180):
        #Defnirea individuala a fiecărei bucle prin adaugarea la
        colectie
        coil13.add(magpy.current.Circle(current=0.015, diameter=61-
n*0.25, position=(0, 0, z)))
    #Pozitionare colectie
    coil13.position = (0, 0, 0)
    #Rotirea colectiei fata de axa y
    coil13.rotate_from_angax(90, "y")
```

A doua bobină (L24) este definită identic, cu mențiunea că poziționarea acesteia este diferită astfel încât cele 2 bobine să nu se suprapună.

```
coil24.position = (-50, 0, 0)
coil24.rotate_from_angax(90, "y")
```

Pentru o fidelitate cât mai ridicată s-a modelat și miezul bobinelor sub forma unui magnet cu magnetizare 0. Toate elementele au fost integrate într-o colecție, iar întreg modelul a fost afișat pentru evaluarea corectitudinii modelului (Figura 34.).

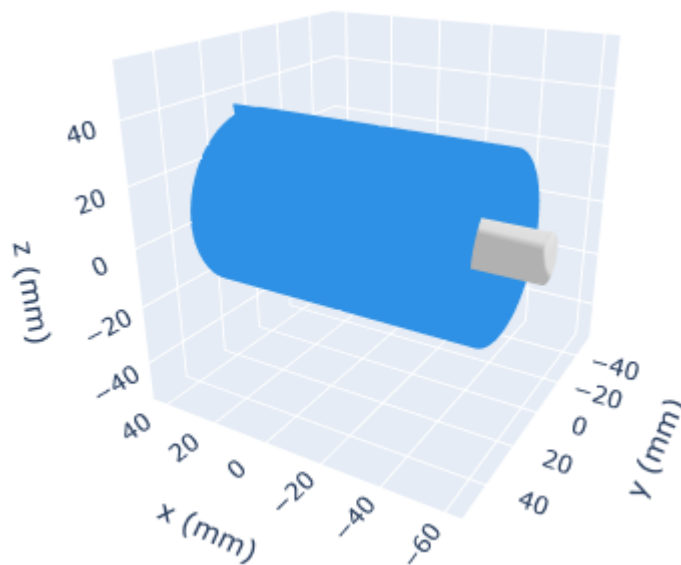


Figura 34. Modelul 3D al bobinelor NF1-800

După modelarea sistemului magnetic al releului se poate evalua comportamentul câmpului magnetic generat de acestea. Magpylib poate efectua analize și reprezentări detaliate ale câmpului magnetic în două dimensiuni. Contururile bobinelor și ale carcasei releului au fost și ele definite în cadrul reprezentărilor.

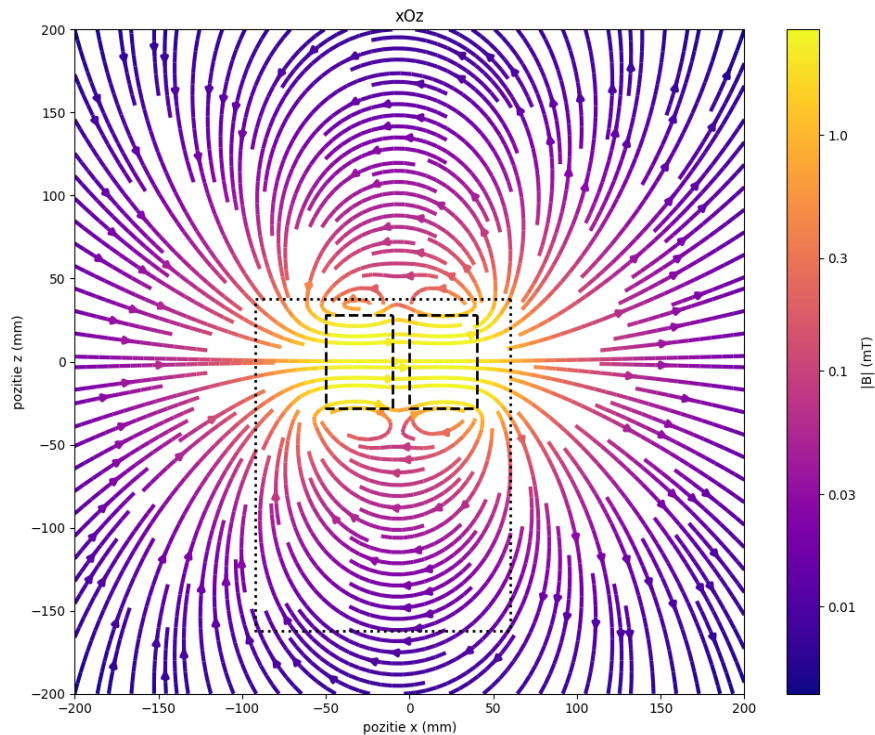


Figura 35. Inducția magnetică simulată în planul xOz (NF1-800)

Toate planurile secționează modelul de-a lungul unei axe. Pentru evaluarea inducției pe planuri paralele este necesară modificarea parametrului constant din definiția spațiului de analiză.

Din simulări reiese că inducția în centrul bobinelor de releu atinge valori de aproximativ 2,5 mT. Inducția din jurul carcusei de releu, în zonele unde se pot amplasa senzori de tip magnetometru prezintă valori cuprinse între 250 – 300 μ T.

În practică releele sunt montate compact în rame de rele. Utilizarea magnetometrelor pentru a monitoriza starea unui releu necesită influențe minime ale câmpului magnetic provocate de releele adiacente. Deoarece releele vecine superioare și inferioară prezintă o distanță mare față de releul de referință, s-au modelat doar releele laterale. Ele au fost definite identic cu modelul prezentat anterior.

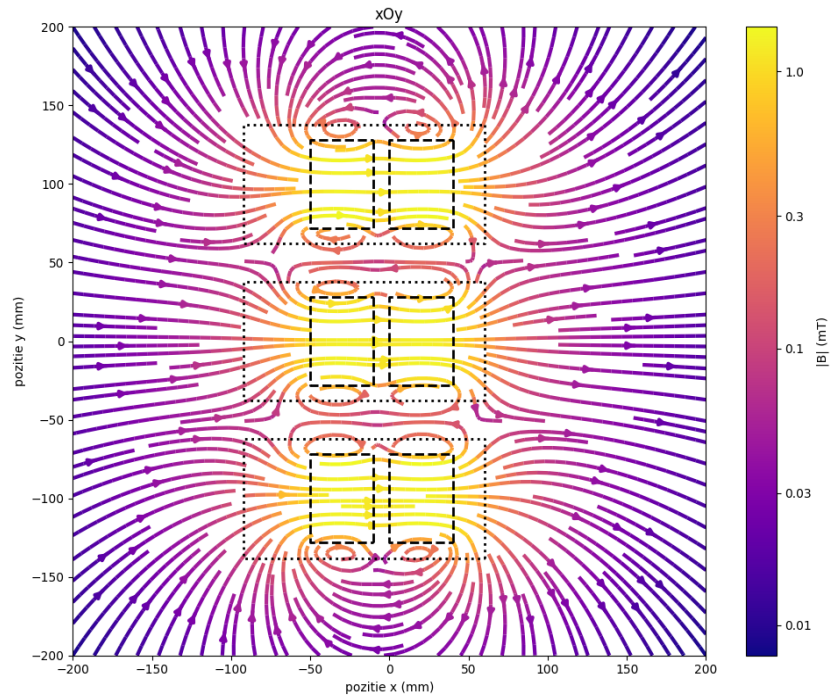


Figura 36. Influența releelor adiacente în planul xOy

Din analiza rezultatelor este evident că influențele releelor adiacente asupra inducției releului de referință sunt neglijabile, sub $10 \mu\text{T}$. O ultimă simulare a influențelor externe s-a efectuat tot în planul xOy, dar la o distanță de aproximativ 1 cm deasupra bobinelor alimentate. Această distanță corespunde carcasei releului și permite estimarea valorilor ce pot fi înregistrate de către un magnetometru.

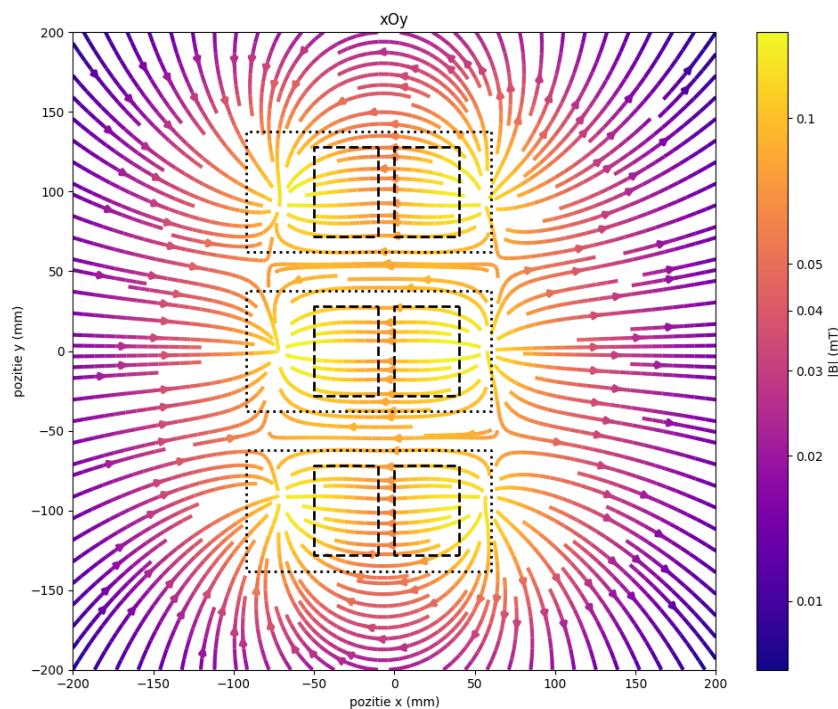


Figura 37. Influența releelor adiacente în planul xOy pe carcasa releului

4.1.3 Efectuarea măsurătorilor

Prin intermediul modelului creat anterior s-a putut evalua comportamentul ideal al câmpului magnetic generat de către releele de tip NF. Pentru a evalua acuratețea modelului și a decide asupra parametrilor de utilizare ale magnetometrelor în detectarea stării releelor s-au realizat o serie de măsurători. Rezultatele acestor măsurători au fost relatate în cadrul unui articol de către autor în 2022 [78].

Pentru a determina forma câmpului magnetic în jurul releelor feroviare și modificările aduse acestuia în timpul funcționării, a fost nevoie de o distribuție în spațiu a măsurătorilor. Spațiul de măsurători a fost definit în jurul unui releu feroviar gravitațional și ținând cont de caracteristicile sensorului utilizat.

Grila de măsurători (Figura 38.) conține 420 de puncte individuale în care s-au efectuat măsurătorile. Punctele au fost distribuite la o distanță de 4,5 cm pe lungime și lățime (axele x și y) unele față de celelalte, iar pe înălțime (axa z) la o distanță de 2 cm. În total, grila de măsurători are dimensiunile de 27 cm (axa x), 18 cm (axa y) și 22 cm (axa z), ceea ce depășește cu mult dimensiunile unui releu feroviar. Acest lucru permite evaluarea influenței câmpului magnetic produs de către un releu asupra vecinilor săi.

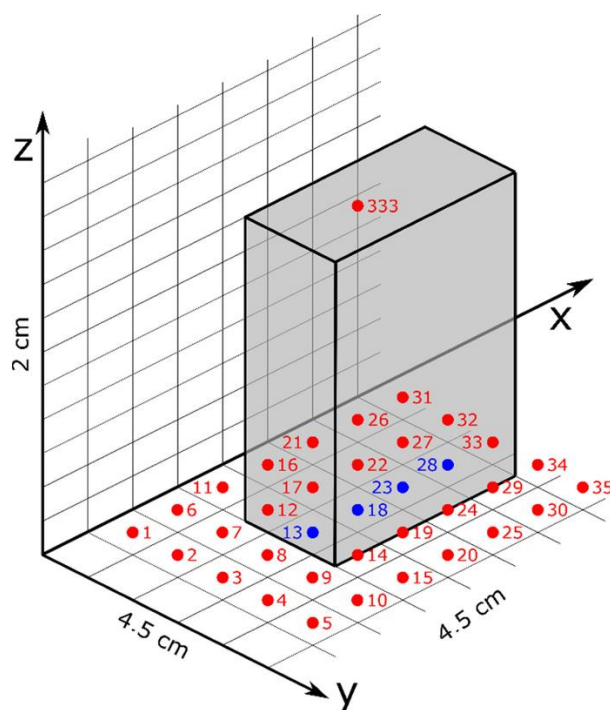


Figura 38. Grila de măsurători definită în jurul unui releu feroviar [78]

Releul a fost așezat pe grilă astfel încât latura mai lungă să fie paralelă cu axa Ox, iar cea mai îngustă cu axa Oy. Acolo unde punctele de măsurare au căzut în interiorul releului (ex: 13, 18, 23, 28), valorile din punctul respectiv au fost estimate prin media punctelor adiacente.

Componentele câmpului magnetic de pe fiecare axă au fost salvate pentru fiecare punct de măsură într-un tabel de tip .csv. Datele au fost ulterior prelucrate și interpretate pentru a scoate în evidență principalele observații.

Grila de măsurare și elementele suport au fost construite folosind componente LEGO, ceea ce a permis o flexibilitate în amplasarea senzorului precum și o poziționare sigură pe un suport cu dimensiuni predeterminate.

Au fost efectuate patru seturi de măsurători distincte care corespund următoarelor stări ale releului: releu nealimentat, releul atras doar cu bobina 1 – 3 alimentată, releul atras doar cu bobina 2 – 4 alimentată și releu atras cu ambele bobine alimentate.

Colectarea datelor referitoare la câmpul magnetic s-a realizat folosind magnetometrul MAG3110 împreună cu placa de dezvoltare de tip Arduino Nano. Comunicarea dintre cele două dispozitive s-a realizat prin interfața I2C, fiind necesar și un element de conversie al nivelului logic dintre ele (3,3 V pentru MAG3110, 5 V pentru Arduino Nano).

Pentru fiecare punct definit pe grila de măsurători s-au efectuat automat trei măsurători consecutive. Media acestor măsurători a fost transmisă către calculator prin interfața serială, fiind înregistrate într-un fișier de tip .csv cu ajutorul extensiei ArduSpreadsheet [79].

4.1.4 Prelucrarea și interpretarea datelor

Cele patru seturi de măsurători au fost prelucrate într-o primă etapă cu ajutorul unui program de calcul tabelar pentru a efectua mediile aritmetice corespunzătoare pozițiilor unde magnetometrul nu a putut fi plasat. Pe baza datelor au fost generate în Python o serie de grafice care ilustrează forma câmpului magnetic pentru cazurile evaluate.

Primul set de măsurători corespunde releului nealimentat. În acest caz, liniile de câmp reprezentate sunt generate exclusiv de către câmpul magnetic al planetei. Aspectul lor este aproape identic pentru fiecare poziție a planurilor reprezentate. Deformările care apar corespund alterării liniilor câmp de către componentele metalice ale releului (Figura 39.).

În cazul alimentării complete a releului prin ambele bobine, câmpul magnetic se modifică semnificativ, atât ca intensitate, cât și ca formă. Diferențele față de scenariul anterior se observă cu precădere în planul xOz.

În Figura 40. se observă foarte clar deformarea liniilor de câmp pe măsură ce planurile se apropie de centrul releului. Deformarea maximă a câmpului se înregistrează la poziția $y=9$ cm, unde planul xOz secționează releul precis în două jumătăți identice față de axa Ox.

Atragerea releului folosind doar câte una dintre bobine a produs, de asemenea, o modificare sesizabilă a liniilor de câmp. Din nou, planurile yOz și xOz au înregistrat cele mai evidente schimbări (Figura 41. Figura 42.).

Soluții pentru monitorizarea și diagnoza de la distanță a instalațiilor de centralizare electrodinamică

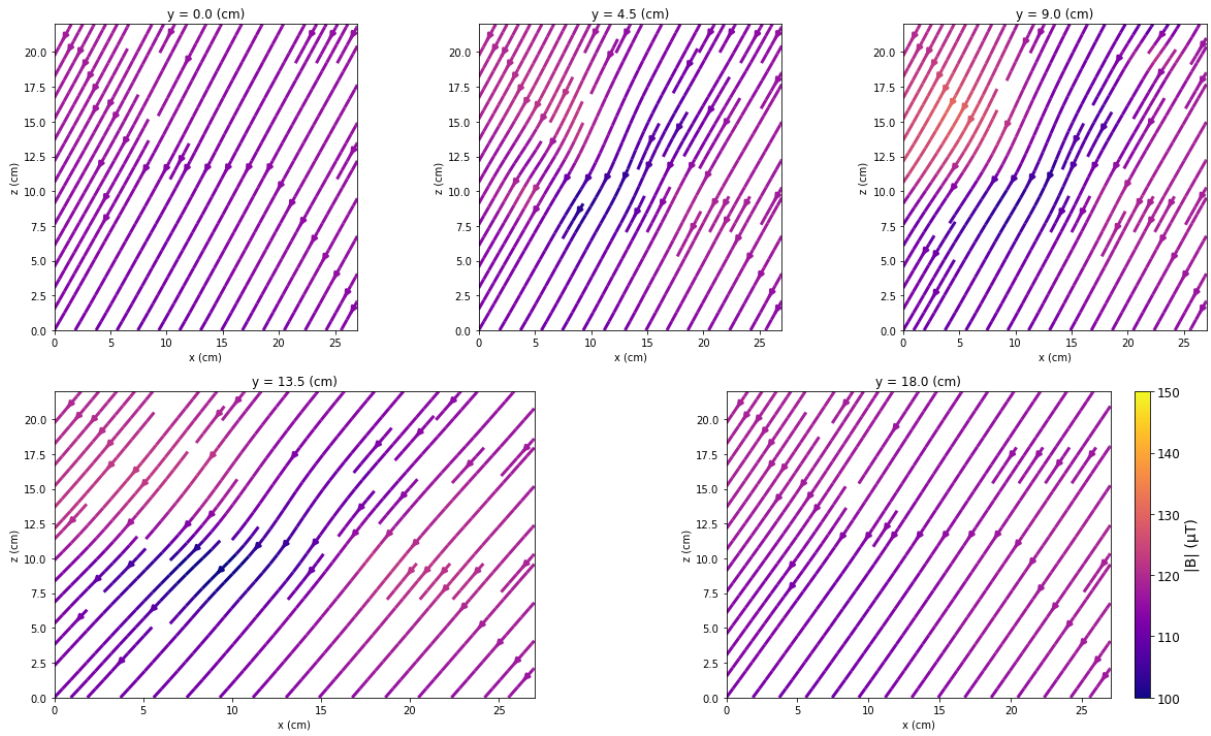


Figura 39. Liniile de câmp pentru planul xOz – Releu nealimentat

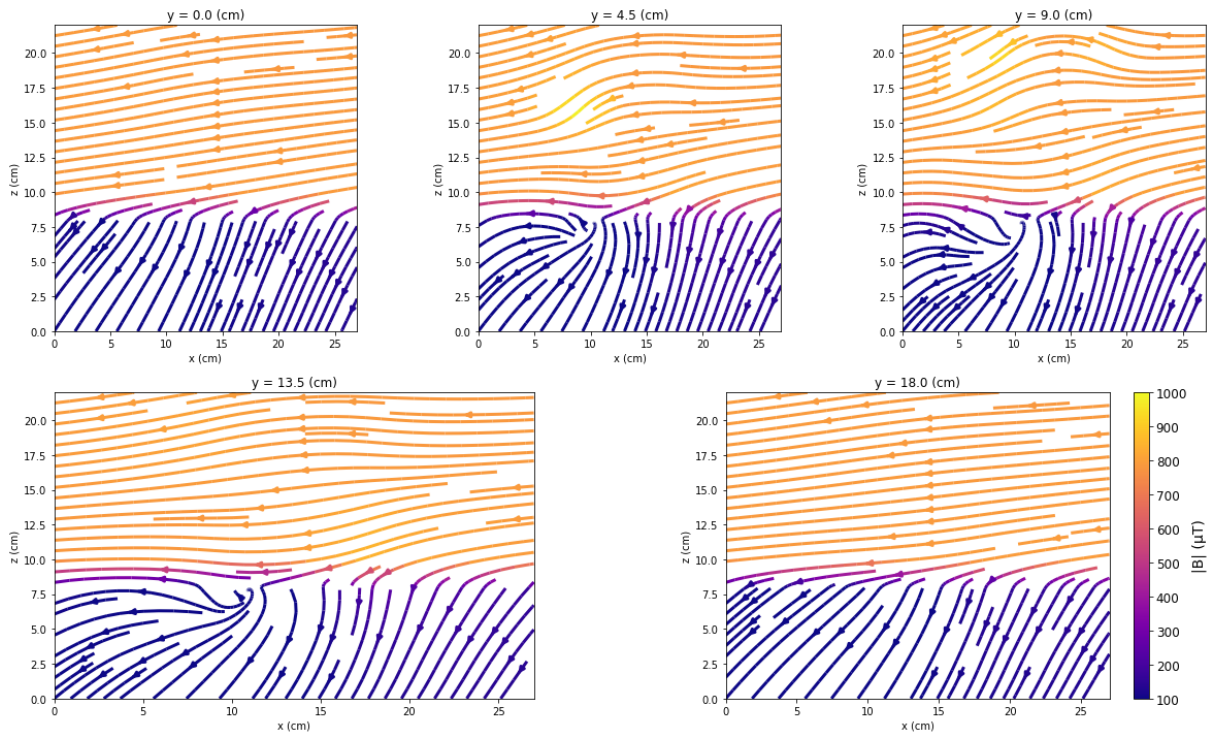


Figura 40. Liniile de câmp pentru planul xOz – Releu alimentat complet

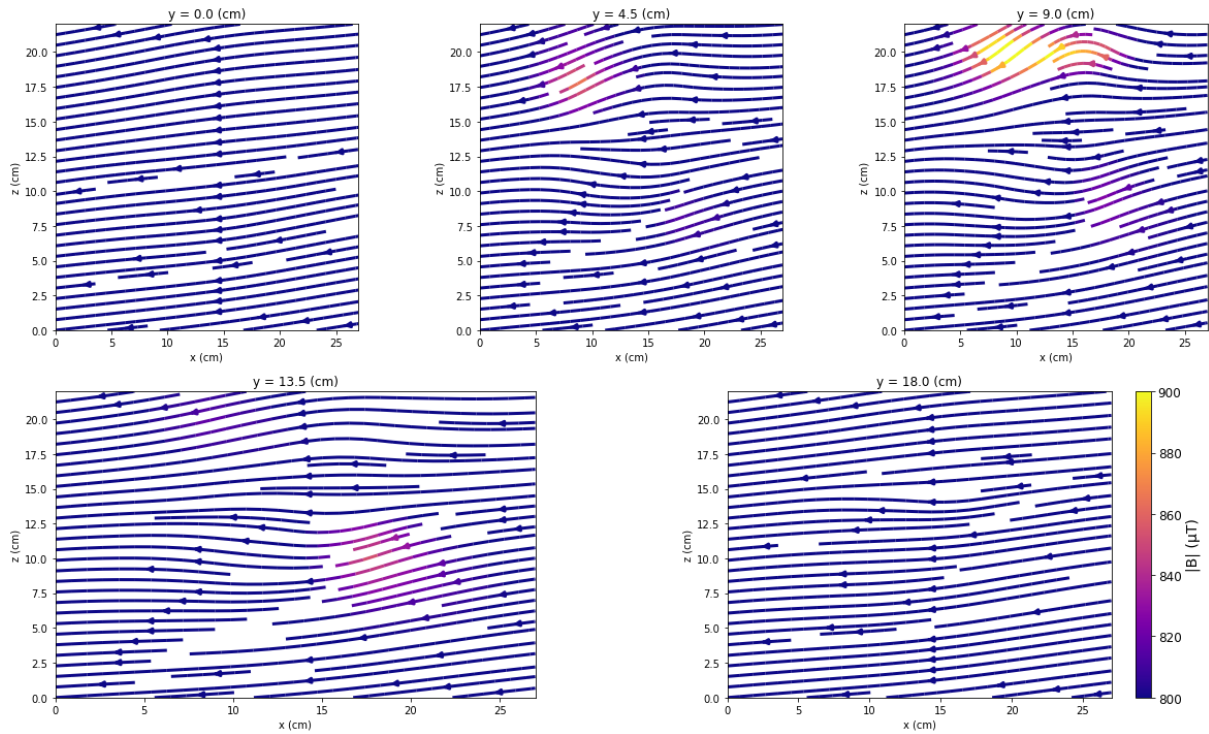


Figura 41. Liniile de câmp pentru planul xOz –L1-3 alimentat

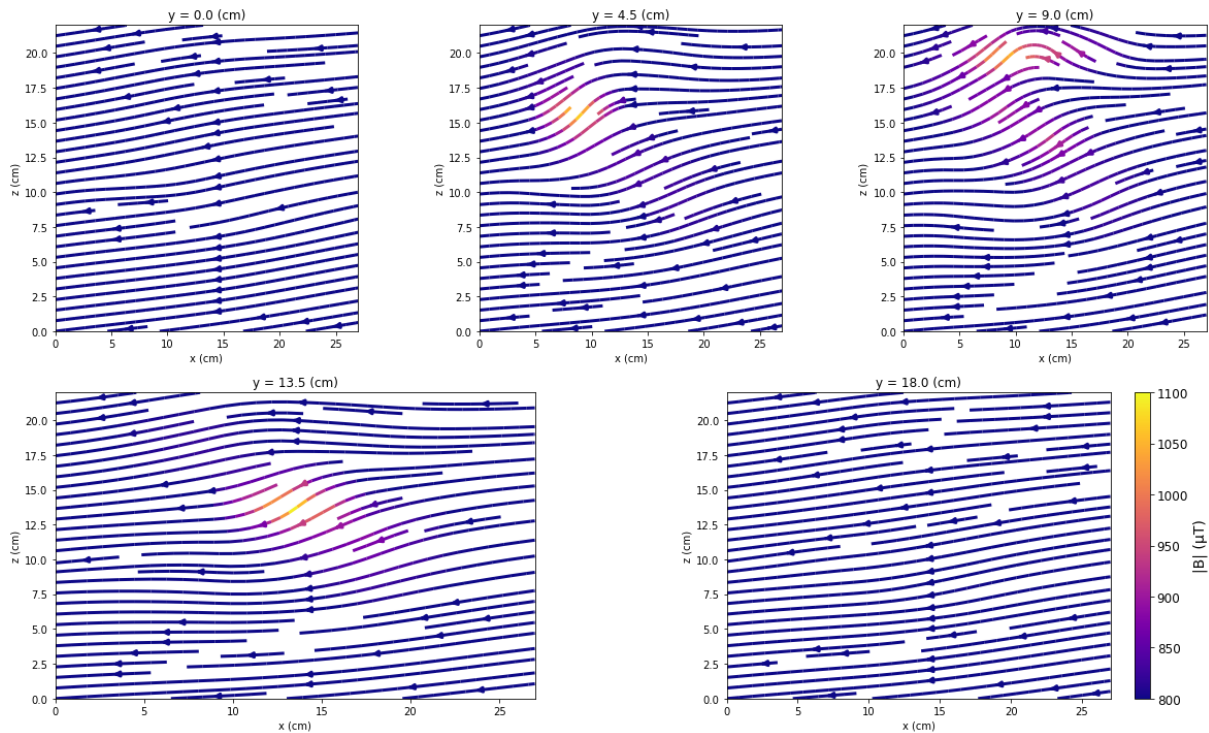


Figura 42. Liniile de câmp pentru planul xOz –L2-4 alimentat

Pe baza datelor prezentate în subcapitolul anterior se pot face un număr de observații cu privire la utilitatea senzorilor de tip magnetometru. Prima observație este că deformările cele mai evidente ale câmpului magnetic au fost înregistrate în planurile xOz. Din reprezentările

grafice se poate distinge, inclusiv, modul de alimentare a releului. Figura 43. compară forma liniilor de câmp pentru același plan xOz în cele trei variante de alimentare posibile.

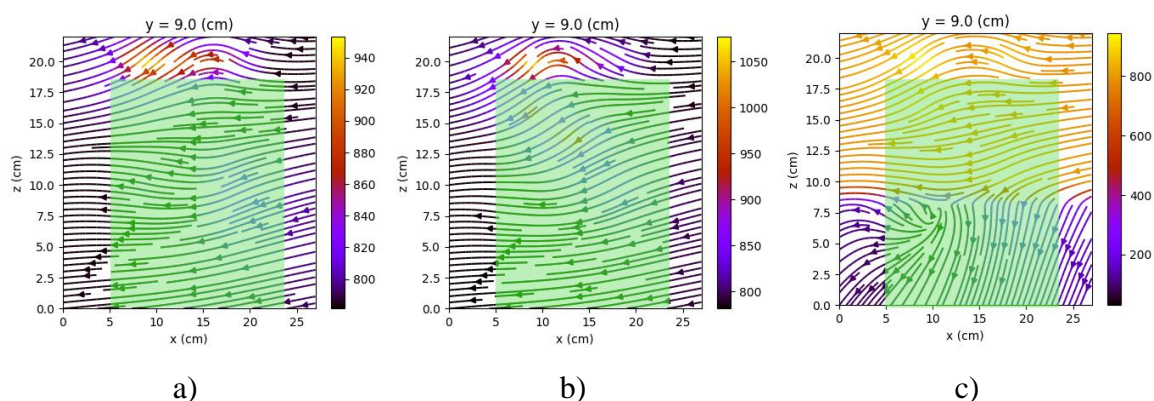


Figura 43. Câmpul magnetic pentru alimentare prin: L1-3 (a), L2-4 (b) și complet (c) [78]

Deformările în planurile yOz sunt și ele sesizabile, dar fără a se putea observa o diferență substanțială în funcție de alimentarea bobinelor. Cele mai mici schimbări sunt înregistrate în planul xOy. Ca atare, discriminarea între diferitele stări ale releului se poate realiza prin măsurători ale inducției magnetice în planul xOz, cu eventuale măsurători secundare în planul yOz.

Poziționarea optimă a magnetometrului este pe carcasa releului, în partea superioară. Acesta ar trebui plasat deasupra zonei de tranziție dintre cele două bobine ale releului. Tabelul de mai jos conține valorile măsurate pe cele trei axe în poziția de montare recomandată, precum și inductanța calculată pe baza acestora în cele trei planuri.

Tabelul 2. Inductanța măsurată în punctul de măsură 333 [78]

Stare releu	x	y	z	$\ xOz\ $	$\ yOz\ $	$\ xOy\ $
Nealimentat	-57.99	799.2	-96.59	112.661	805.016	801.301
L1-3 alimentată	-783.28	798.765	-193.605	806.852	821.893	1118.728
L2-4 alimentată	-782.34	797.84	25.46	782.754	798.246	1117.410
Alimentat complet	-783.38	798.86	-78.83	787.336	802.740	1118.866

Din forma câmpului magnetic în planurile yOz și xOz se poate sesiza că influența bobinelor alimentate scade rapid în afara releului. Astfel, influențele acestora asupra releelor vecine poate fi neglijată.

Măsurătorile confirmă comportamentul câmpului magnetic din vecinătatea releului NF, precum și influența neglijabilă a releelor adiacente față de releul de referință. Diferențele dintre model și măsurători pot fi observate la forma generală a liniilor de câmp, în special în planul xOy, dar și în valorile măsurate mai ridicate ale inducției magnetice. Acestea se pot explica prin absența din model a tuturor elementelor constructive care aparțin releului, dar și prin inexistența influenței câmpului magnetic terestru asupra modelului.

Concluziile modelării și măsurătorilor confirmă potențialul de utilizare al magnetometrelor pentru detectarea stării releelor feroviare, oferind de asemenea o posibilitate optimă de amplasare a magnetometrelor pe carcasa releelor NF deasupra celor două bobine.

4.2 Implementarea unei rețele WSN pentru instalațiile CED

4.2.1 Considerente generale

Structura întregului sistem de monitorizare al unei instalații CED prin intermediul unei rețele WSN a fost detaliată în Capitolul 3. Acest subcapitol descrie testarea sistemului cu scopul de evaluare al performanțelor acestuia.

După cum a fost descris anterior, sistemul propus implementează două canale distincte de date referitoare la funcționarea instalației CED. Primul canal preia semnalele electrice de la pupitrul de comandă și le folosește pentru rularea programului de centralizare dezvoltat în limbaj Ladder, în timp ce al doilea canal preia datele primite de la rețeaua WSN montată direct pe relele instalației. S-a dorit evaluarea a trei obiective principale:

- Acuratețea programului de centralizare dezvoltat în limbaj Ladder;
- Performanța rețelei WSN;
- Compararea rezultatelor obținute prin cele două canale de date.

4.2.2 Desfășurarea măsurătorilor

Testele au fost efectuate pe instalația CED a departamentului Telecomenzi și Electronică în Transporturi. Structura și componentele acestei instalații, precum și modul de dezvoltare al programului de centralizare pentru echipamente de tip PLC au fost prezentate anterior. S-a ales evaluarea sistemului pentru parcursul de ieșire de la Y2.

Programul de centralizare încărcat pe PLC necesită preluarea comenzilor date de către IDM la pupitrul de comandă. Legătura fizică dintre PLC și pupitru s-a implementat prin intermediul regletelor existente în partea inferioară a pupitrului. S-au monitorizat prin intermediul intrărilor digitale ale PLC-ului starea butonului semnalului Y2. Pentru fiecare poziție de interes a butonului de semnal (apăsător, tras) s-a prevăzut o legătură cu PMC (Figura 44.).

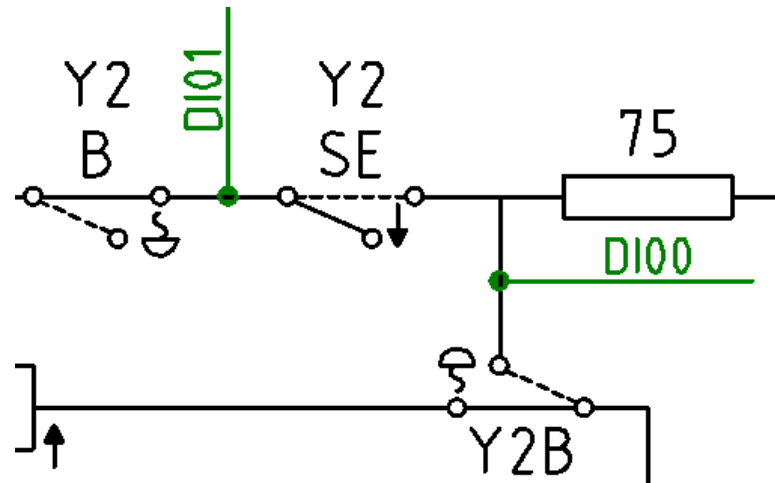


Figura 44. Locul de legătură al intrărilor digitale PMC (schema KS)

Pentru a permite o legătură cât mai facilă cu releele instalației CED, dispozitivul PMC a fost montat în rama de relee cu ajutorul unei șine de fixare tip DIN. Bornele de alimentare (+24 și GND) ale PMC au fost conectate la releele de +24 V, respectiv ±12 V ale instalației CED.

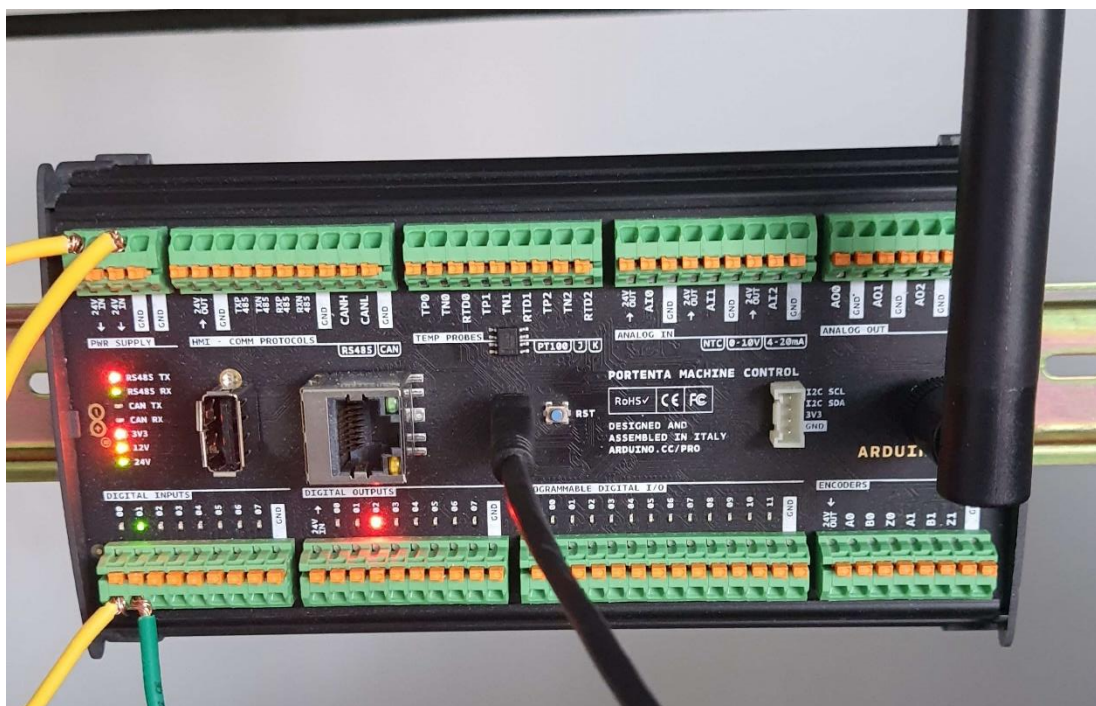


Figura 45. PMC montat în rama CED

Pentru evaluarea performanței rețelei WSN au fost amplasate patru noduri distincte pe releele cele mai relevante stabilirii parcursului de ieșire de la Y2. Releele supravegheate au fost: Y2 IP, 1 KS, 1Z și Y2 SE.

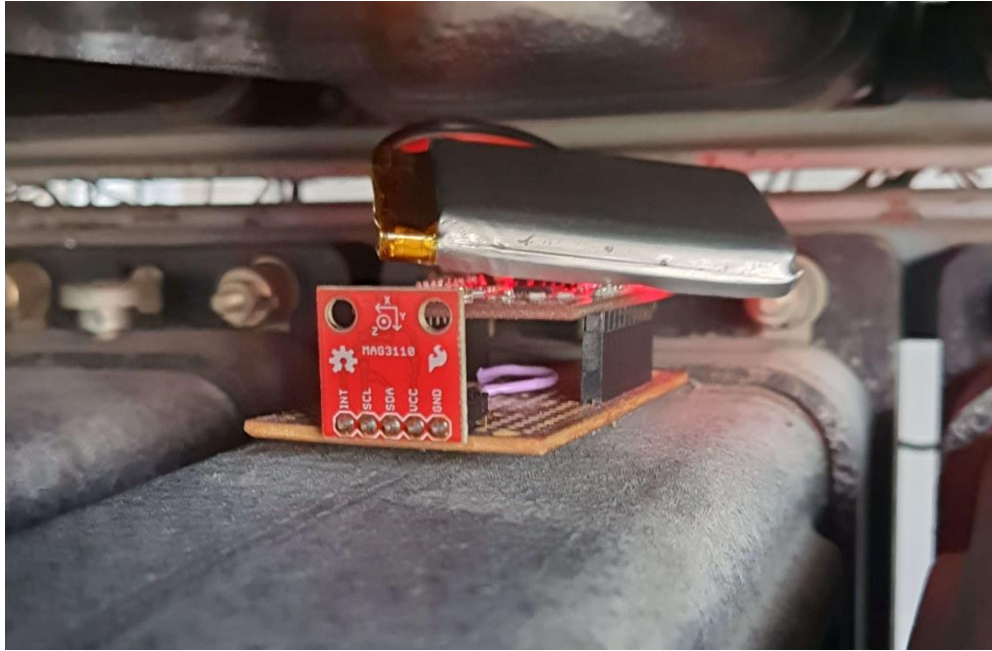


Figura 46. Amplasarea nodului de senzor pe un releu NF

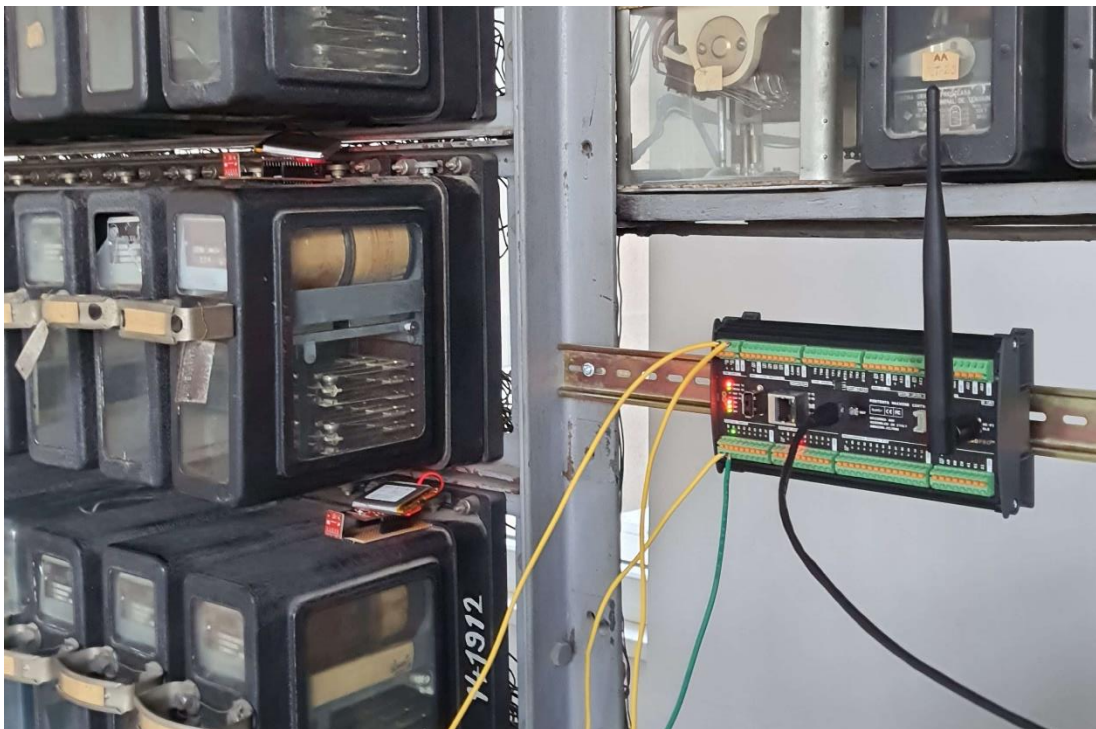


Figura 47. Ansamblul de testare

4.2.3 Prelucrarea și interpretarea datelor

Arduino PLC IDE permite comunicarea în timp real cu PMC prin intermediul conexiunii seriale prin USB. Se pot monitoriza atât variabile fizice, care corespund intrărilor și ieșirilor fizice, dar și variabile care se regăsesc strict la nivel software.

În funcționarea unei instalații CED există o succesiune de funcționarea a schemelor, astfel încât schimbarea stării unor relee provoacă schimbări ale stărilor altor relee. Figura 48. prezintă succesiunea de funcționare a principalelor relee aferente parcursului de ieșire de la Y2.

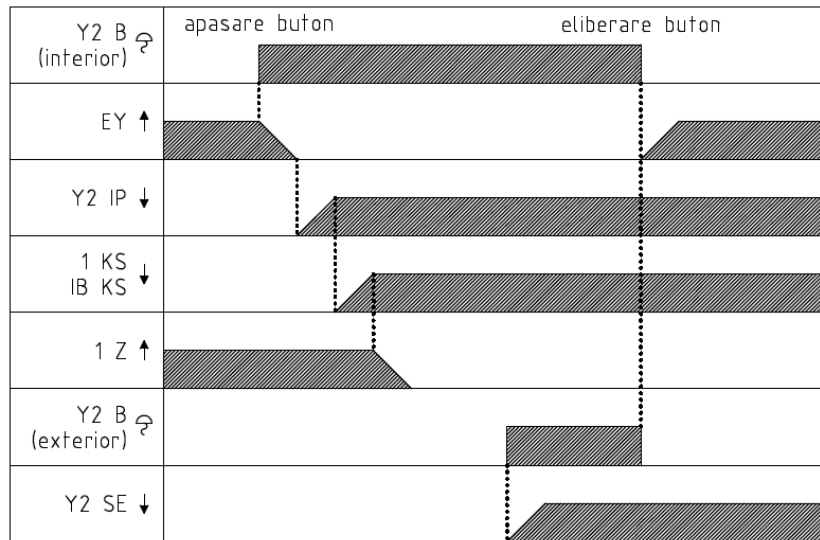


Figura 48. Secvența de funcționare a releelor pentru parcursul de ieșire de la Y2

Prima serie de teste a presupus evaluarea acurateții programului de centralizare dezvoltat în Ladder. S-au monitorizat variabilele asociate releelor menționate în figura anterioară. Pentru comandarea parcursului (Figura 49.) s-au reprezentat suplimentar intrarea digitală a PMC (Y2_a_f), precum și variabila asociată butonului de program (Y2B_a).

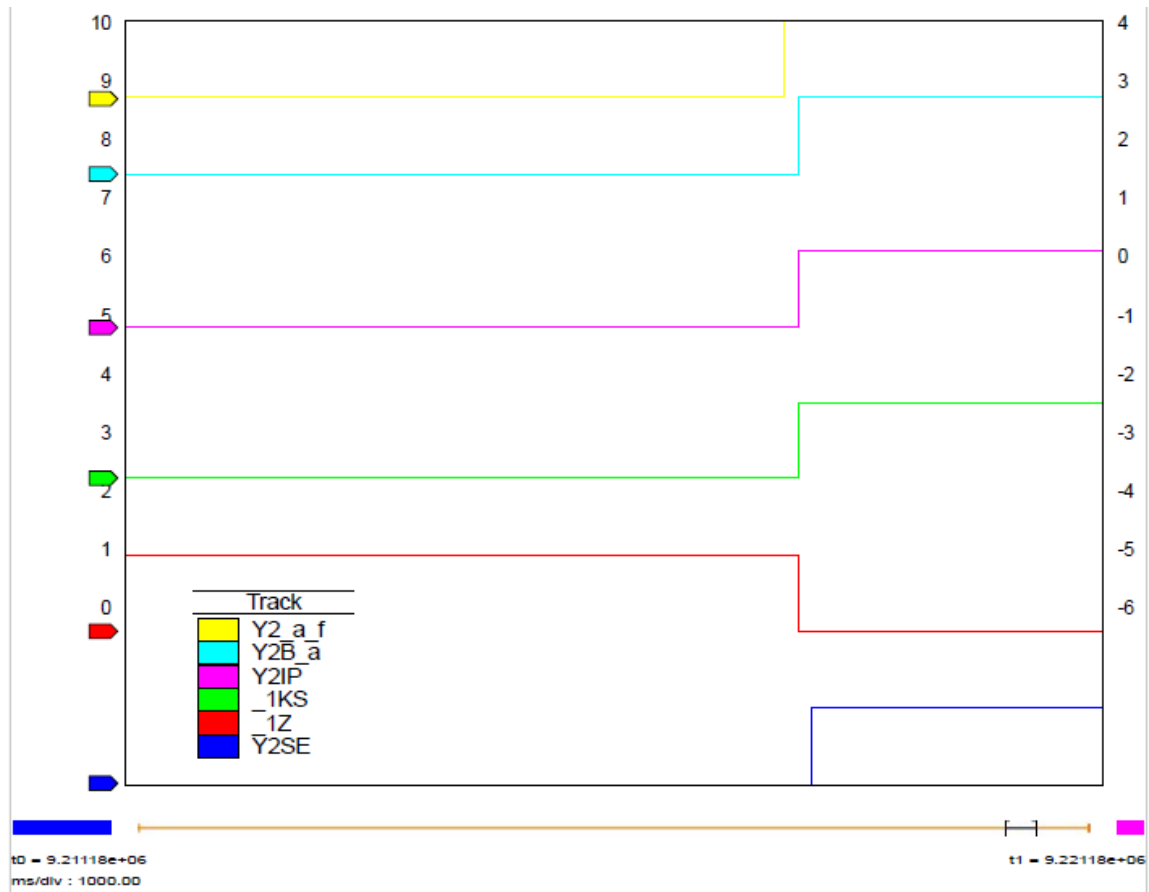


Figura 49. Starea variabilelor Ladder la comandarea parcursului de ieșire Y2

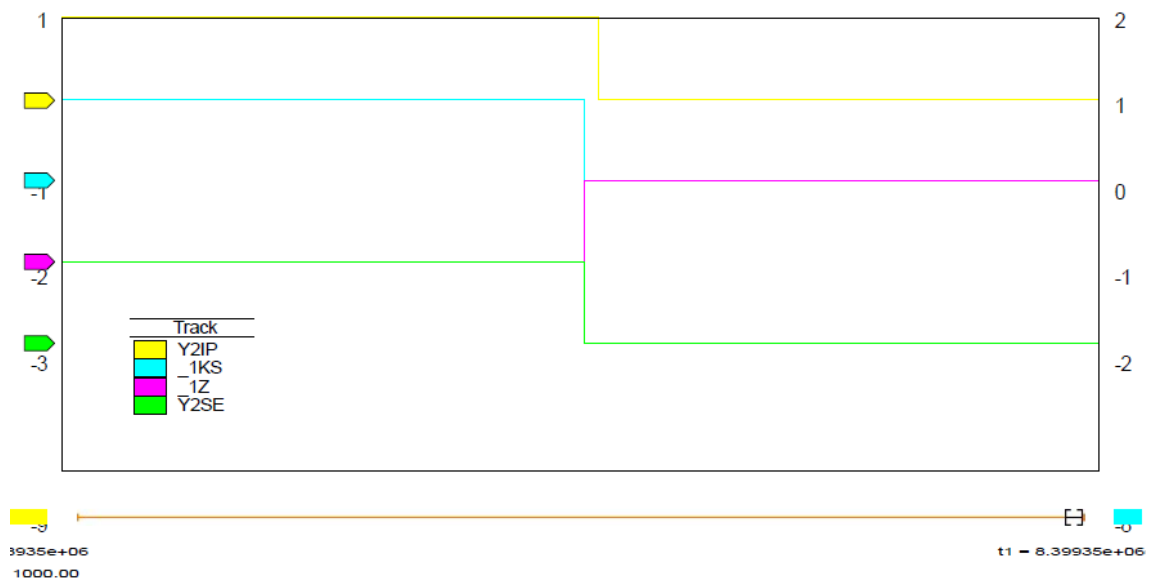


Figura 50. Starea variabilelor Ladder la anularea parcursului de ieșire Y2

Din vizualizarea stării releelor în cazul stabilirii parcursului (Figura 49.) și în cazul anulării acestuia de la pupitru (Figura 50.) se observă că programul de centralizare funcționează identic din punct de vedere al succesiunii variabilelor cu instalația CED reală. Diferența principală vine din timpul de răspuns mult mai mic al programului Ladder, fapt explicat prin inexistența întârzierii intrinseci de atragere a releelor reale.

A doua serie de teste (Figura 51. și Figura 52.) a presupus înregistrarea datelor primite de la nodurile rețelei WSN. Denumirile nodurilor de rețea au următoarele corespondențe:

- S1 – Y2 IP;
- S2 – 1 KS;
- S3 – 1 Z;
- S4 – Y2 SE.

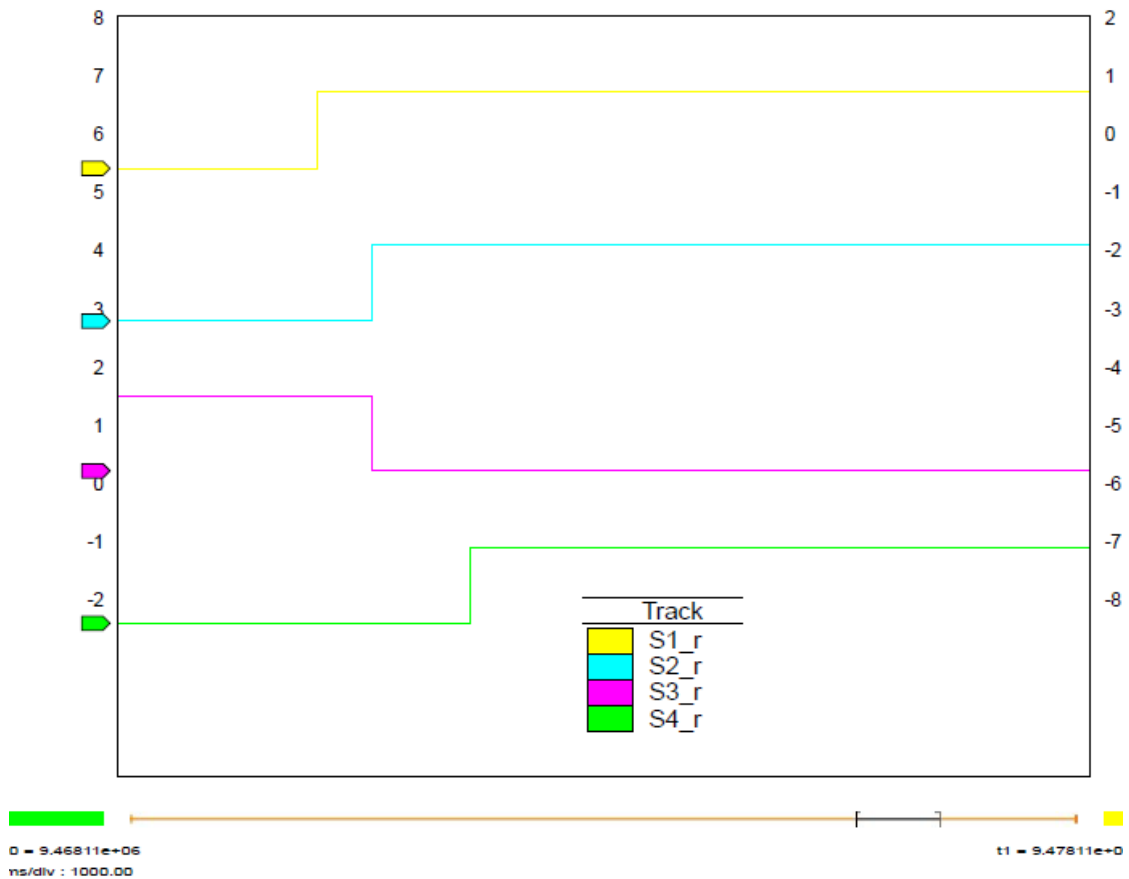


Figura 51. Stabilirea parcursului de ieșire de la Y2 – rețea WSN

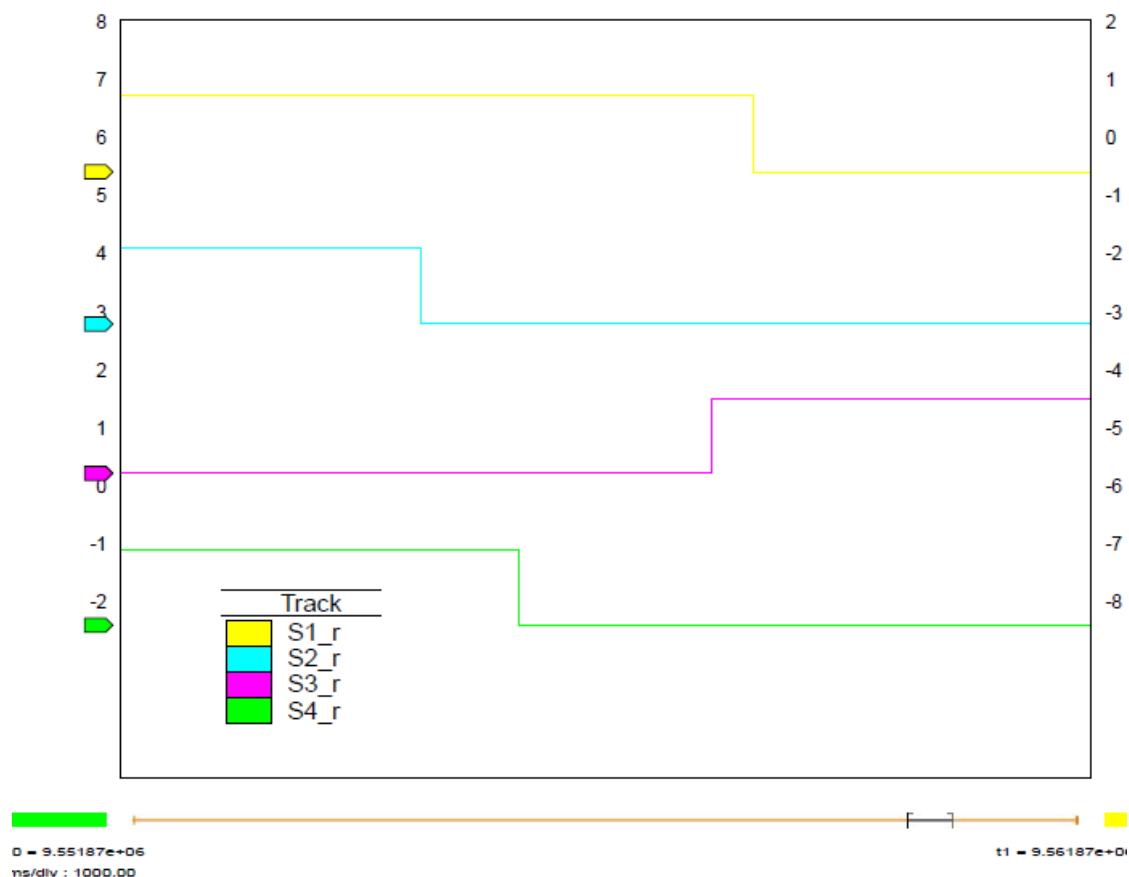


Figura 52. Anularea parcursului de ieșire de la Y2 – rețea WSN

Datele primite de la senzori arată o secvență de funcționare tipică pentru o instalație CED CR-2. Spre deosebire de variabilele programului Ladder, rețeaua WSN înregistrează o ușoară întârziere în schimbarea de stare a releelor. Acest fenomen este explicat de timpii intrinseci de acționare ale releelor feroviare.

Ultimul set de măsurători a evaluat simultan cele două metode prezentate anterior. Din observarea modului de comportare la stabilirea (Figura 53.), respectiv anularea (Figura 54.) parcursului considerat, se poate observa o întârziere generală a datelor de la rețeaua WSN în comparație cu variabilele corespunzătoare din programul Ladder. Tabelul 3. centralizează datele de întârziere la nivel de variabilă monitorizată.

Tabelul 3. Diferența de timp dintre variabilele Ladder și cele din rețeaua WSN

Variabile monitorizate	Δt [ms]	
	Stabilire parcurs	Anulare parcurs
Y2 IP	200	3000
1 KS	1000	700
1 Z	1000	2600
Y2 SE	2800	500

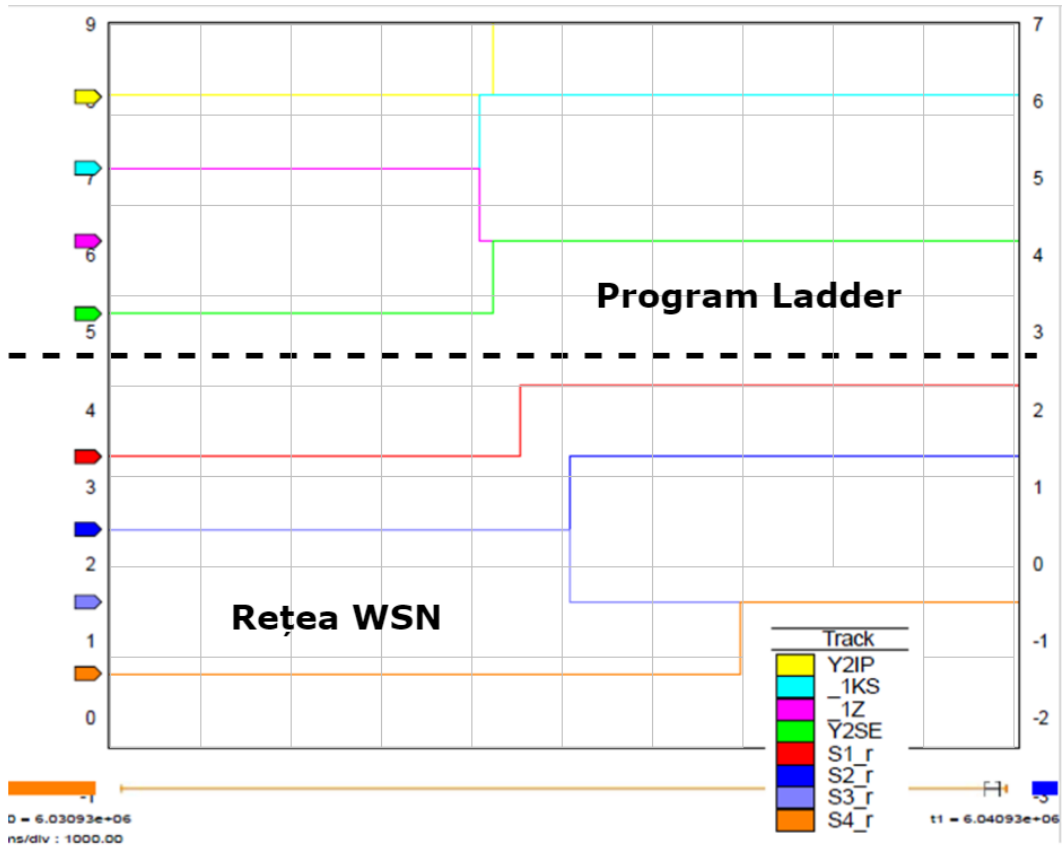


Figura 53. Stabilirea parcurșului Ladder vs. WSN

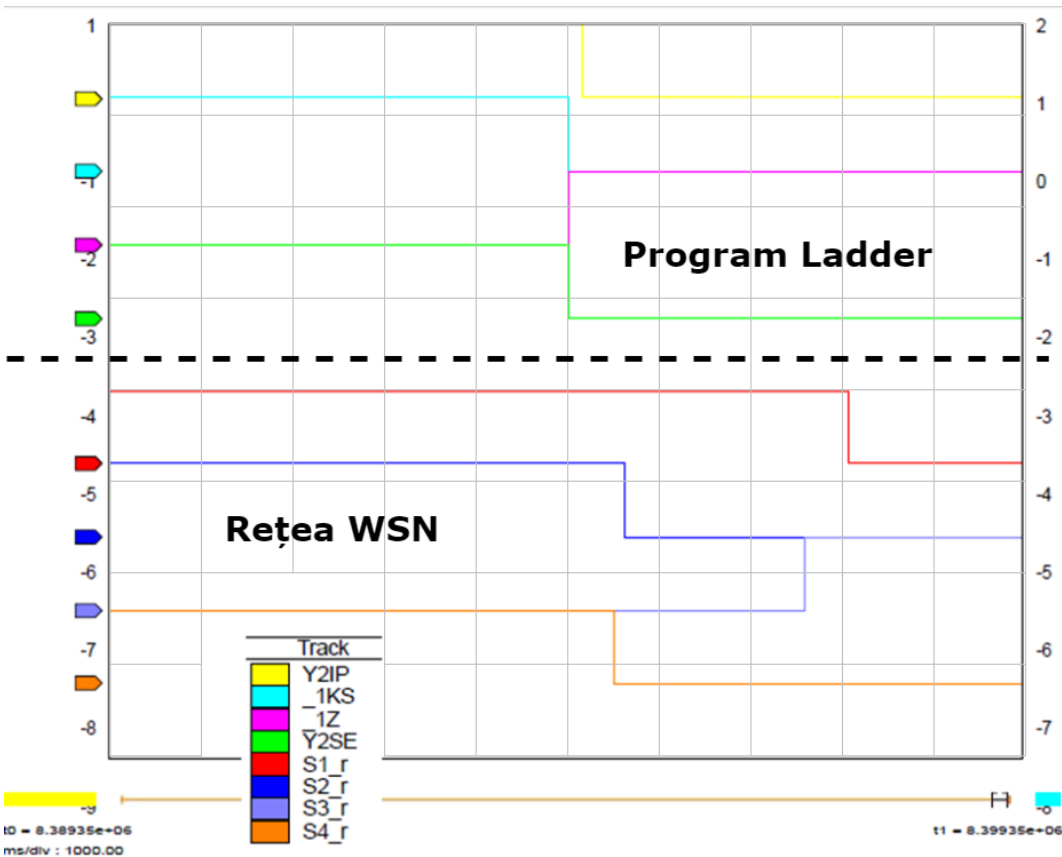


Figura 54. Anularea parcurșului Ladder vs. WSN

Asemenea cazurilor anterioare, întârzierea de schimbare de stare a releelor reale, în comparație cu variabilele Ladder corespunzătoare, este explicată prin temporizarea intrinsecă a releelor la atragere și cădere.

Detectarea erorilor de funcționare în instalația CED se realizează prin compararea perechilor de variabile Ladder cu relele monitorizate de către rețeaua WSN. Din punct de vedere al operațiilor logice, răspunsul corect al sistemului corespunde cazurilor când cele două variabile dintr-o pereche au aceeași valoare logică. Acest comportament corespunde funcției logice de sau exclusiv negat (Figura 55.).



Figura 55. Compararea variabilelor Ladder cu cele din rețeaua WSN

Capitolul 5. Contribuții originale și direcții de cercetare

Tema prezentei lucrări reprezintă etapa finală a unui parcurs academic de zece ani în cadrul Facultății de Transporturi de la Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București. Domeniul telematicii feroviare a reprezentat o preocupare constantă de-a lungul tuturor ciclurilor de învățământ superior, pornind de la lucrarea de licență în domeniul Inginerie Electronică și Telecomunicații, specializarea Telecomenzi și Electronică în Transporturi (*Sistem de semnalizare pentru transportul feroviar urban*, sub coordonarea S.I. dr. ing. Maria Claudia Surugiu), continuând cu lucrarea de disertație în cadrul programului de masterat Sistem Inteligente de Transporturi (*Simulator electronic de centralizare electrodinamică (ECED)*), sub coordonarea S.I. dr. ing. Valentin Iordache) și culminând cu lucrarea prezentă.

Activitatea de patru ani în funcția de asistent universitar în cadrul departamentului Telecomenzi și Electronică în Transporturi m-a ajutat să consolidez cunoștințele dobândite în ciclurile de studiu anterioare. Experiențele dobândite prin susținerea laboratoarelor de Sisteme de Dirijare a Traficului Feroviar și de Centralizări în Stații, precum și a proiectului de Centralizări în Stații au fost esențiale pentru definirea tematicii centrale a tezei. Dezvoltarea laboratorului de Prelucrare Digitală a Semnalelor mi-a permis însușirea cunoștințelor necesare lucrului în limbajul Python. Experiența lucrului cu dispozitivele de tip PLC, necesară dezvoltării soluției propuse în teză, a fost dobândită grație dezvoltării laboratorului de Automatizări și Telecomunicații.

Din cercetările teoretice și practice desfășurate pe parcursul realizării prezentei lucrări se remarcă următoarele contribuții originale:

1. Redactarea unui studiu documentar privind principiile esențiale în proiectarea sistemelor de centralizare feroviară;
2. Elaborarea unui studiu privitor la rețelele de tip WSN, ilustrând aspecte generale ale arhitecturii fizice și de comunicații, dar și aplicații în domeniul feroviar;
3. Redactarea unei documentații tehnice și științifice privitoare la dispozitivele de tip PLC și la utilitatea acestora în domeniul feroviar;
4. Dezvoltarea unui model util simulării din punct de vedere magnetic al releelor feroviare cu scopul de evaluare al perturbațiilor introduse de acestea pe timpul funcționării în câmpul magnetic. Modelul a fost dezvoltat în Python cu ajutorul bibliotecii Magpylib (versiunea 4);
5. Conceperea, proiectarea și implementarea unei rețele de tip WSN bazată pe magnetometre pentru monitorizarea individuală a releelor din instalațiile CED;
6. Propunerea și exemplificarea unei metode de digitalizare a schemelor cu contacte și rele specifice instalațiilor CED în limbaj Ladder adecvat implementării logicii feroviare prin intermediul dispozitivelor de tip PLC;

7. Evaluarea acurateții softului de centralizare dezvoltat în limbaj Ladder prin comparația rezultatelor obținute din program cu cele din instalația CED reală pe baza acelorași comenzi;
8. Evaluarea monitorizării corecte a instalației CED prin intermediul rețelei WSN prin comparația cu starea așteptată a releelor supravegheate provenită din reproducerea logicii feroviare în Ladder.

Pe parcursul celor 4 ani aferenți stagiului de doctorat, autorul s-a bucurat de îndrumarea constantă a conducătorului științific, prof. dr. ing. Corneliu Mihail Alexandrescu, precum și de cea a membrilor comisiei de îndrumare (Conf. dr. ing. ec. Florin Codruț Nemțanu, S.I. dr. ing. Claudia Maria Surugiu și S.I. dr. ing. Laurențiu Dorin Bureștea). Pe lângă aceștia, autorul a beneficiat de susținerea întregului colectiv al departamentului Telecomenzi și Electronică în Transporturi. În mod special au fost apreciate sfaturile și ghidajul domnului Director de Departament, Conf. dr. ing. Marius Minea, ale Conf. dr. ing. Andrei Răzvan Gheorghiu, Conf. dr. ing. Angel Ciprian Cormoș și S.I. dr. ing. Valentin Iordache.

5.1 Direcții de cercetare

Din cercetările desfășurate pe parcursul realizării prezentei lucrări se disting două direcții principale de dezvoltare în viitor.

Prima este legată de realizarea unui sistem suport complet pentru instalațiile CED prin intermediul rețelei WSN. Testele efectuate au confirmat utilitatea magnetometrelor în monitorizarea stării individuale a releelor neutre fișă. Prin virtualizarea logicii feroviare se poate monitoriza evalua permanent starea fiecărui releu, ceea ce conferă un avantaj în cazul identificării deranjamentelor, chiar și de către personalul mai puțin experimentat cu instalațiile CED. Supravegherea neinvazivă a releelor reprezintă un aspect esențial pentru o eventuală implementare pe scară largă prin faptul că instalarea nodurilor senzor nu afectează funcționarea normală a elementelor din rama de rele.

În prezent platforma Arduino PLC se află la o versiune incipientă, ceea ce implică anumite limitări pe partea de utilizarea a tuturor funcțiilor disponibile pe dispozitivele PLC compatibile. O mare provocare în acest sens a fost legată de implementarea comunicațiilor dintre controllerul central și nodurile WSN. Este de așteptat ca platforma să fie optimizată treptat, asemenea celorlalte produse și servicii de la Arduino.

Soluția propusă poate fi dezvoltată mai departe prin:

- Optimizarea energetică a nodurilor prin implementarea modului sleep, transmisa de date efectuându-se doar în momentul schimbării de stare a releului;
- Utilizarea unui protocol de comunicații cu performanțe mai bune. O variantă ar fi folosirea protocolului MQTT care este deja utilizat în multe aplicații din domeniul IoT;
- Folosirea unei benzi de frecvențe dedicate. Sistemul a fost testat cu tehnologii de comunicații care funcționează în banda liberă. Aceasta este folosită curent de

foarte multe aplicații, ceea ce poate afecta performanțele rețelei. Pentru aplicațiile feroviare există, de obicei, benzi rezervate de către regulatorul local de telecomunicații. Utilizarea unei benzi dedicate ar reduce posibilitatea de interferențe cu alte servicii;

- Dezvoltarea unei soluții de monitorizare a releelor de tip cod fișă. Din cauza geometriei lor, nu se poate folosi aceeași metodă de amplasare a nodurilor senzor ca în cazul releelor neutre.

A doua direcție de cercetare care se desprinde din cele expuse în cadrul prezentei lucrări este de simplificare a proiectării elementelor software pentru instalațiile de centralizare electronică. România are avantajul de a avea o arhitectură standardizată la nivel de instalații de centralizare cu relee, ceea ce permite stabilirea unor reguli de traducere a logicii lor în logică software. Metodele propuse în teză pot fi folosite ca puncte de început pentru dezvoltarea unor astfel de standarde.

Printre avantajele stabilirii acestor norme de tranziție se numără:

- Timp redus de dezvoltare software (în cazul în care topologia stației nu suferă modificări substanțiale față de situația prezentă);
- Reducerea costurilor de modernizare prin posibilitatea mai multor producători de a participa la dezvoltarea sistemelor de centralizare electronică. În prezent piața este structurată sub forma unui oligopol format din câțiva producători, ceea ce duce la costuri ridicate de implementare a centralizărilor electronice.

Lucrări publicate de autor

1. Florin Bădău, Borna Abramović, Angel Ciprian Cormoș, and V. Iordache, “Management of Urban and Regional Rail: Case Study Bucharest,” *Logi*, vol. 11, no. 2, pp. 120–131, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.2478/logi-2020-0021>.
2. Răzvan Andrei Gheorghiu, Florin Bădău, and V. Iordache, “Applicability of Magnetic Sensors in Interlocking Systems,” *Sensors*, vol. 22, no. 12, pp. 4314–4314, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22124314>. WOS: 000818179400001
3. Florin BĂDĂU, “Railway Interlockings – A Review of the Current State of Railway Safety Technology in Europe,” *Promet*, vol. 34, no. 3, pp. 443–454, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.7307/ptt.v34i3.3992>. WOS: 000810060800007
4. Florin Bădău, Valentin Alexandru Stan, and Răzvan Andrei Gheorghiu, “Energy efficiency analysis of relay railway interlockings,” Jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/ecai58194.2023.10193972>.

Bibliografie

- [1] A. I. Stan și S. David, *Centralizări electrodinamice și bloc de linie automat*, vol. 1. București: Editura Didactică și Pedagogică, 1983.
- [2] Ministerul Lucrărilor Publice Transporturilor și Locuinței, *Ordinul nr. 1186/2001 pentru aprobarea Regulamentului de exploatare tehnică feroviară nr. 002*. București, 2001.
- [3] S. Carstens, *Signale – Die Entwicklung des Signalwesens vom optischen Telegraphen zum Ks-Signal*, vol. 1. MIBA Verlag, 2014.
- [4] C. și Turismului. A. F. R. România. Ministerul Transporturilor, *Regulamentul de semnalizare nr. 004*. București: Editura Feroviară, 2006.
- [5] N. Ignat, „Comanda și controlul obiectelor centralizate -curs-”, 1996.
- [6] A. I. Stan și S. David, *Centralizări electrodinamice și bloc de linie automat*, vol. 2. București: Editura Didactică și Pedagogică, 1984.
- [7] CN CFR SA, „Anexa 6 Compatibilitatea parcurșurilor”, 1.2., 2017.
- [8] CN CFR SA, „Anexa 8 Drumuri de alunecare”, 1.2.
- [9] G. Theeg și S. Vlasenko, Ed., *Railway Signalling & Interlocking - International Compendium*, 2-lea ed. Hamburg: PMC Media House GmbH, 2018.
- [10] U. Maschek, „Sicherheit des Schienenverkehrs”, *Sicherung des Schienenverkehrs*, 2018, doi: 10.1007/978-3-658-22878-1.
- [11] J. Pacht, „Systemtechnik des Schienenverkehrs”, *Systemtechnik des Schienenverkehrs*, 2011, doi: 10.1007/978-3-8348-8307-0.
- [12] C. M. Alexandrescu, A. Chiș, S. David, și A. I. Stan, *Echipamente electrice și electronice pentru căi ferate – Manual pentru licee industriale cu profil de electrotehnică, clasele a XI-a și a XII-a*. București: Editura Didactică și Pedagogică, 1978.
- [13] P. I. Nr. 924 bis MINISTERUL T. ȘI I. MONITORUL OFICIAL AL ROMÂNIEI, *ORDIN privind aprobarea condițiilor pe care trebuie să le îndeplinească subsistemul de control-comandă și semnalizare terestre al sistemului feroviar din România*. București, 2023.
- [14] I. Popa, Șt Turi, C. Țurcașu, și V. Pascu, *Centralizări*, vol. 1. Centrul de documentare și publicații tehnice M.T.Tc., 1973. Data accesării: 24 decembrie 2023. [Online]. Disponibil la: <https://pdfcoffee.com/instalaii-cem-cfr-3-pdf-free.html>
- [15] OMRON, „Electromechanical Relays Technical Information”. Data accesării: 28 decembrie 2023. [Online]. Disponibil la: https://www.mouser.com/pdfdocs/Omron_Relay_Tech_Information_0911.PDF
- [16] UIC Rail System Forum, „Use of signalling relays”, 2018.
- [17] N. Popa și N. Finanțu, *Instalații de centralizare cu relee*. București: Editura Transporturilor și Telecomunicațiilor, 1960.

- [18] „Релейные централизации - СЦБИСТ - железнодорожный форум, блоги, фотогалерея, социальная сеть”. Data accesării: 7 ianuarie 2024. [Online]. Disponibil la: <http://scbist.com/releinye-centralizacii/>
- [19] *American Railway Signaling Principles and Practices - Chapter VI Direct Current Relays*. New York: Association of American Railroads, 1941.
- [20] „Westinghouse: Time Code and Circuit Code”. Data accesării: 7 ianuarie 2024. [Online]. Disponibil la: https://ekeving.se/ctc/ctc193x/Wh/Wh_J173.html
- [21] „Railnet.ro - pasionatii de trenuri si transporturi din Romania • Vezi subiect - Istoricul sistemelor de semnalizare si dirijare a circulatiei”. Data accesării: 5 decembrie 2023. [Online]. Disponibil la: <https://www.railnet.ro/viewtopic.php?f=119&t=4105>
- [22] Ministerul Căilor Ferate - Direcția generală a electrificării centralizării și telecomandă, „Documentația omologată pentru instalațiile de centralizare electrodinamică tip CR-3”, vol. I. Centrul de documentare și publicații tehnice, București, 1967.
- [23] F. Bădău, „Simulator electronic de centralizare electrodinamică (ECED)”, Lucrarea de disertație, UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” DIN BUCUREȘTI FACULTATEA TRANSPORTURI, București, 2020.
- [24] „Signalling Engineering”. Data accesării: 29 ianuarie 2024. [Online]. Disponibil la: <https://eulynx.eu/dataprep-2023-03/index.htm>
- [25] EULYNX, „ANNUAL REPORT 2022”. Data accesării: 29 ianuarie 2024. [Online]. Disponibil la: <https://eulynx.eu/storage/simple-file-list/Reports/EULYNX-Annual-Report-2022.pdf>
- [26] S.-H. Yang, „Wireless Sensor Networks”, 2014, doi: 10.1007/978-1-4471-5505-8.
- [27] V. Ramasamy și V. Ramasamy, „Mobile Wireless Sensor Networks: An Overview”, *Wireless Sensor Networks - Insights and Innovations*, oct. 2017, doi: 10.5772/INTECHOPEN.70592.
- [28] M. J. McGrath și C. N. Scanaill, „Sensor technologies: Healthcare, wellness, and environmental applications”, *Sensor Technologies: Healthcare, Wellness, and Environmental Applications*, pp. 1–302, ian. 2013, doi: 10.1007/978-1-4302-6014-1/COVER.
- [29] D. Kandris, C. Nakas, D. Vomvas, și G. Koulouras, „Applications of Wireless Sensor Networks: An Up-to-Date Survey”, *Applied System Innovation 2020, Vol. 3, Page 14*, vol. 3, nr. 1, p. 14, feb. 2020, doi: 10.3390/ASI3010014.
- [30] UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” DIN BUCUREȘTI FACULTATEA TRANSPORTURI Departamentul Telecomenzi și Electronică în Transporturi, „Rețele de calculatoare Curs”. Data accesării: 28 aprilie 2023. [Online]. Disponibil la: <http://tet.pub.ro/Documente/Materiale%20pentru%20studen%C8%9Bi/An%20IV/RC/Retele%20de%20Calculatoare%20-%20Curs.pdf>

- [31] M. Farsi, M. A. Elhosseini, M. Badawy, H. Arafat Ali, și H. Zain Eldin, „Deployment Techniques in Wireless Sensor Networks, Coverage and Connectivity: A Survey”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 28940–28954, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2902072.
- [32] A. Manjeshwar și D. P. Agrawal, „TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks”, *Proceedings - 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium, IPDPS 2001*, pp. 2009–2015, 2001, doi: 10.1109/IPDPS.2001.925197.
- [33] A. A. Rajan, A. Swaminathan, Brundha, și B. Pajila, „A Comparative Analysis of LEACH, TEEN, SEP and DEEC in Hierarchical Clustering Algorithm for WSN Sensors”, *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol. 33, pp. 395–403, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-28364-3_39/COVER.
- [34] X. Liu, „A Survey on Clustering Routing Protocols in Wireless Sensor Networks”, *Sensors 2012, Vol. 12, Pages 11113-11153*, vol. 12, nr. 8, pp. 11113–11153, aug. 2012, doi: 10.3390/S120811113.
- [35] H. M. A. Fahmy, „Protocol Stack of WSNs”, *Signals and Communication Technology*, pp. 53–66, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-58015-5_2.
- [36] IEEE Computer Society. LAN/MAN Standards Committee., „IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks”, *IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)*, vol. 2020, pp. 1–800, 2020, Data accesării: 11 iunie 2023. [Online]. Disponibil la: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=9144689>
- [37] S. Ondřej, B. Zdeněk, F. Petr, și H. Ondřej, „ZigBee technology and device design”, *Proceedings of the International Conference on Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies, ICN/ICONS/MCL'06*, vol. 2006, pp. 129–138, 2006, doi: 10.1109/ICNICONSMCL.2006.233.
- [38] S. Farahani, „ZigBee and IEEE 802.15.4 Protocol Layers”, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, pp. 33–135, 2008, doi: 10.1016/B978-0-7506-8393-7.00003-0.
- [39] I. G. Lee *et al.*, „WiFi HaLow for Long-Range and Low-Power Internet of Things: System on Chip Development and Performance Evaluation”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, nr. 7, pp. 101–107, iul. 2021, doi: 10.1109/MCOM.001.2000815.
- [40] H. B. Hu, W. L. Luo, S. X. Liu, și Y. M. Zhang, „Design of a New Fire Detection and Alarm System Based on Self-Organizing Wireless Sensor Networks”, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 52–54, pp. 1142–1146, 2011, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.52-54.1142.
- [41] H. Alawad și S. Kaewunruen, „Wireless Sensor Networks: Toward Smarter Railway Stations”, *Infrastructures 2018, Vol. 3, Page 24*, vol. 3, nr. 3, p. 24, iul. 2018, doi: 10.3390/INFRASTRUCTURES3030024.
- [42] M. Dima, I. A. Chihaiia, M. C. Surugiu, și M. Minea, „Preventive Maintenance of the Railway Infrastructure employing Robotized Platform and Virtual Instrumentation”,

- Proceedings of the 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2018*, apr. 2019, doi: 10.1109/ECAI.2018.8679065.
- [43] B. N. Suhas, S. Bhagavat, V. Vimalanand, și P. Suresh, „Wireless Sensor Networks Based Monitoring of Railway Tracks”, *2018 International CET Conference on Control, Communication, and Computing, IC4 2018*, pp. 187–192, nov. 2018, doi: 10.1109/CETIC4.2018.8531029.
- [44] Z. S. Alhachimy și S. T. Hasson, „Modeling the Behavior of the Linear Wireless Sensor Networks”, *2022 International Conference of Science and Information Technology in Smart Administration, ICSINTESA 2022*, pp. 123–127, 2022, doi: 10.1109/ICSINTESA56431.2022.10041650.
- [45] F. Subhan, M. Noreen, M. Imran, M. Tariq, A. Khan, și M. Shoaib, „SPECIAL SECTION ON COLLABORATION FOR INTERNET OF THINGS Impact of Node Deployment and Routing for Protection of Critical Infrastructures”, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2891667.
- [46] „Application of IEEE Std 802.15.4”. Data accesării: 13 iunie 2023. [Online]. Disponibil la: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/14/15-14-0226-00-0000-802-15-4-applications.pdf>
- [47] F. Petruzella, *Programmable Logic Controllers*, 5-lea ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017.
- [48] K. Kamel și E. Kamel, *Programmable Logic Controllers - Industrial Control*. McGraw-Hill Education, 2014.
- [49] R. W. Lewis și I. of E. Engineers, *Programming Industrial Control Systems Using IEC 1131-3*. în IEE control engineering series. Institution of Electrical Engineers, 1995. [Online]. Disponibil la: <https://books.google.ro/books?id=-74eAQAAIAAJ>
- [50] „RS232 Protocol – Basics - ElectronicsHub”. Data accesării: 17 februarie 2024. [Online]. Disponibil la: <https://www.electronicshub.org/rs232-protocol-basics/>
- [51] K. Wang și H. Liu, „RS-485 Basics Series”, 2021, Data accesării: 18 februarie 2024. [Online]. Disponibil la: www.ti.com
- [52] „MODBUS Application Protocol Specification V1.1b3 Modbus”, 2012, Data accesării: 18 februarie 2024. [Online]. Disponibil la: <http://www.modbus.org>
- [53] C. Lerch, „Eurolocking - a modular, standardised digital interlocking”, *Signal+Draht*, pp. 20–24, septembrie 2020.
- [54] F. Makkinga, P. Musters, și T. Bell, „New SIL 4 PLC interlocking reduces lifecycle costs”, *Signal+Draht*, pp. 46–49, iulie 2015.
- [55] BÄR Bahnsicherung AG, „EUROLOCKING Fact sheet”, Data accesării: 19 februarie 2024. [Online]. Disponibil la: www.bb-rail.com
- [56] F. BĂDĂU, „Railway Interlockings – A Review of the Current State of Railway Safety Technology in Europe”, *Promet - Traffic&Transportation*, vol. 34, nr. 3, pp. 443–454, iun. 2022, doi: 10.7307/ptt.v34i3.3992.

- [57] „Portenta Machine Control — Arduino Official Store”. Data accesării: 28 februarie 2024. [Online]. Disponibil la: <https://store.arduino.cc/products/arduino-portenta-machine-control>
- [58] „Arduino® Portenta Machine Control”.
- [59] „GitHub - arduino-libraries/Arduino_PortentaMachineControl: The official, revamped Arduino Library for the Portenta Machine Control.” Data accesării: 3 martie 2024. [Online]. Disponibil la: https://github.com/arduino-libraries/Arduino_PortentaMachineControl
- [60] V. Iordache și R. A. Gheorghiu, *Tehnologii informaționale: lucrări practice cu ESP8266*. București: POLITEHNICA PRESS, 2022.
- [61] „SparkFun ESP8266 Thing”. Data accesării: 23 februarie 2024. [Online]. Disponibil la: https://doc.riot-os.org/group__boards__esp8266__sparkfun-thing.html
- [62] „ESP8266 Thing Development Board Hookup Guide - SparkFun Learn”. Data accesării: 23 februarie 2024. [Online]. Disponibil la: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/esp8266-thing-development-board-hookup-guide/hardware-overview>
- [63] „Application Report 2.4-GHz Inverted F Antenna”, 2021, Data accesării: 23 februarie 2024. [Online]. Disponibil la: www.ti.com
- [64] „Hall Effect Sensor and How Magnets Make It Works”. Data accesării: 22 februarie 2024. [Online]. Disponibil la: <https://www.electronicstutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>
- [65] A. C. Cormoș, V. Iordache, și C. M. Surugiu, *Materiale și componente pasive electronice -noțiuni fundamentale-*. București: Cartea Studențească, 2011.
- [66] „Xtrinsic MAG3110 Three-Axis, Digital Magnetometer - Datasheet”. Data accesării: 22 februarie 2024. [Online]. Disponibil la: <https://www.nxp.com/docs/en/datasheet/MAG3110.pdf>
- [67] „SparkFun Triple Axis Magnetometer Breakout - MAG3110 - SEN-12670 - SparkFun Electronics”. Data accesării: 22 februarie 2024. [Online]. Disponibil la: <https://www.sparkfun.com/products/retired/12670>
- [68] „GitHub - sparkfun/SparkFun_MAG3110_Breakout_Board_Arduino_Library: Arduino Library for the SparkFun Triple Axis Magnetometer Breakout - MAG3110”. Data accesării: 22 februarie 2024. [Online]. Disponibil la: https://github.com/sparkfun/SparkFun_MAG3110_Breakout_Board_Arduino_Library
- [69] V. Iordache, A. C. Cormoș, și I. M. Costea, *Senzori, traductoare și achiziții de date cu Arduino UNO: lucrări practice*. București: POLITEHNICA PRESS, 2016.
- [70] „Using PLC IDE With Arduino Cloud | Arduino Documentation”. Data accesării: 6 martie 2024. [Online]. Disponibil la: <https://docs.arduino.cc/software/plc-ide/tutorials/plc-ide-cloud-support/>
- [71] „Arduino Library List - Arduino Libraries”. Data accesării: 6 martie 2024. [Online]. Disponibil la: <https://www.arduinolibraries.info/>

- [72] „Serial Monitor in the PLC IDE - Software / PLC IDE - Arduino Forum”. Data accesării: 26 martie 2024. [Online]. Disponibil la: <https://forum.arduino.cc/t/serial-monitor-in-the-plc-ide/1134804/2>
- [73] A. C. Cormoș, D. L. Bureștea, și V. Iordache, *Circuite Logice -noțiuni fundamentale-*. București: Cartea Studențească, 2011.
- [74] H. D. Young, R. A. Freedman, și A. L. Ford, *Sears and Zemansky's University Physics: With Modern Physics*. Addison-Wesley, 2012. [Online]. Disponibil la: <https://books.google.ro/books?id=1YXznQEACAAJ>
- [75] „Magnetic field strength [Encyclopedia Magnetica™]”. Data accesării: 12 martie 2024. [Online]. Disponibil la: https://www.e-magnetica.pl/doku.php/magnetic_field_strength
- [76] M. Basharat, M. Ding, H. Cai, Y. Li, și J. Fang, „Design and Analysis of Multilayer Solenoid Coil for Faraday Modulator”, *MATEC Web of Conferences*, vol. 114, p. 04004, iul. 2017, doi: 10.1051/MATECCONF/201711404004.
- [77] „Magpylib API — Magpylib 5.0.0rc0 documentation”. Data accesării: 13 martie 2024. [Online]. Disponibil la: https://magpylib.readthedocs.io/en/latest/_pages/docu/docu_magpylib_api.html#docu-magpylib
- [78] R. A. Gheorghiu, F. Badau, și V. Iordache, „Applicability of Magnetic Sensors in Interlocking Systems”, *Sensors*, vol. 22, nr. 12, 2022, doi: 10.3390/s22124314.
- [79] „Logging Arduino Serial Output to CSV/Excel (Windows/Mac/Linux) - Circuit Journal”. Data accesării: 17 martie 2024. [Online]. Disponibil la: <https://circuitjournal.com/arduino-serial-to-spreadsheet>